UNIVERSITÉ DE PARIS — FACULTÉ DE MÉDECINE

ANNÉE 1928

THÈSE

N°

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'État)

PRÉSENTÉE PAR

JEAN DUBOST

Préparateur de Physique Médicale
à la Faculté de Médecine de Paris
Né à Paris le 1er Février 1902

De la Mesure de la Conductibilité du Corps Humain en Courants Alternatifs de Basse Fréquence

---

Président : M. STROHL

AU COMMERCE DES IDÉES
26, Boulevard Saint-Michel
PARIS
—
1928

UNIVERSITÉ DE PARIS — FACULTÉ DE MÉDECINE

ANNÉE 1928

THÈSE

N° .....

POUR LE

DOCTORAT EN MÉDECINE

(Diplôme d'État)

PRÉSENTÉE PAR

JEAN DUBOST

Préparateur de Physique Médicale
à la Faculté de Médecine de Paris
Né à Paris le 1er Février 1902

De la Mesure de la Conductibilité du Corps Humain en Courants Alternatifs de Basse Fréquence

---

Président : **M. STROHL**

AU COMMERCE DES IDÉES
26, Boulevard Saint-Michel
PARIS

1928

De la Mesure de la Conductibilité du Corps humain en Courants Alternatifs de Basse Fréquence

FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

LE DOYEN ..... **M. ROGER.**

I. — PROFESSEURS

	MM.
Anatomie	ROUVIÈRE.
Anatomie médico-chirurgicale	CUNÉO.
Physiologie	H. ROGER.
Physique médicale	STROHL.
Chimie organique et chimie générale	DESGREZ.
Bactériologie	LEMIERRE.
Parasitologie et histoire naturelle médicale	BRUMPT.
Pathologie et thérapeutique générales	Marcel LABBÉ.
Pathologie médicale	SICARD.
Pathologie chirurgicale	LECÈNE.
Anatomie pathologique	ROUSSY.
Histologie	CHAMPY.
Pharmacologie et matière médicale	TIFFENEAU.
Thérapeutique	LŒPER.
Hygiène	Léon BERNARD
Médecine légale	BALTHAZARD.
Histoire de la médecine et de la chirurgie	MÉNÉTRIER.
Pathologie expérimentale et comparée	RATHERY.
Clinique médicale	CARNOT. BEZANÇON. ACHARD. WIDAL.
Hygiène et clinique de la première enfance	MARFAN.
Clinique des maladies des enfants	NOBÉCOURT.
Clinique des maladies mentales et des maladies de l'encéphale	H. CLAUDE.
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques	JEANSELME.
Clinique des maladies du système nerveux	GUILLAIN.
Clinique des maladies infectieuses	TEISSIER.
Clinique chirurgicale	DELBET. HARTMANN. LEJARS. GOSSET.
Clinique ophtalmologique	TERRIEN.
Clinique urologique	LEGUEU.
Clinique d'accouchements	COUVELAIRE. BRINDEAU. JEANNIN.
Clinique gynécologique	J.-L. FAURE.
Clinique chirurgicale infantile et orthopédie	OMBRÉDANNE.
Clinique thérapeutique médicale	VAQUEZ.
Clinique oto-rhino-laryngologique	SEBILEAU.
Clinique thérapeutique chirurgicale	DUVAL.
Clinique propédeutique	SERGENT.
Professeur sans chaire	ROUVIÈRE. BRANCA.

II. — AGRÉGÉS EN EXERCICE

MM.	
ABRAMI	Pathologie médicale
ALAJOUANINE	Neurologie et psychiatrie.
AUBERTIN	Pathologie médicale
BASSET	Pathologie chirurgicale.
BAUDOIN	Pathologie médicale
BINET	Physiologie.
BLANCHETIÈRE	Chimie biologique.
BROCQ	Pathologie chirurgicale.
BRULÉ	Pathologie médicale
CADENAT	Pathologie chirurgicale.
CHABROL	Pathologie médicale
CHAMPY	Histologie.
CHIRAY	Pathologie médicale
CLERC	Pathologie médicale
DEBRÉ	Hygiène.
DOGNON	Physique.
DONZELOT	Pathologie médicale
DUVOIR	Médecine légale.
ÉCALLE	Obstétrique.
FIESSINGER	Pathologie médicale
GARNIER	Pathologie expérile.
GATELLIER	Pathologie chirurgicale.
HARVIER	Pathologie médicale
HEITZ-BOYER	Urologie.

MM.	
HOVELACQUE	Anatomie.
HUTINEL	Pathologie médicale.
JOYEUX	Parasitologie.
LABBÉ (Henri)	Chimie biologique.
LARDENNOIS	Pathologie chirurgicale.
LEMAITRE	Oto-rhino-laryngologie.
LEROUX	Anatomie pathologique.
LÉVY-SOLAL	Obstétrique.
LHERMITTE	Pathologie mentale.
LIAN	Pathologie médicale.
MATHIEU	Pathologie chirurgicale.
METZGER	Obstétrique.
MONDOR	Pathologie chirurgicale.
MOURE	Pathologie chirurgicale.
MULON	Histologie.
PHILIBERT	Bactériologie.
QUÉNU	Pathologie chirurgicale.
RICHET Fils	Physiologie.
SÉZARY	Dermatologie et syphiligraphie.
VALLERY-RADOT (Pasteur)	Pathologie médicle
VAUDESCAL	Obstétrique.
VELTER	Ophtalmologie.
VERNE	Histologie.

III. — AGRÉGÉS RAPPELÉS A L'EXERCICE

pour le service des examens

MM.	
GOUGEROT	Pathologie médicale
GUÉNIOT	Obstétrique.
DEMELIN	Obstétrique.
LEQUEUX	Obstétrique.

MM.	
RETTERER	Histologie.
TANON	Pathologie médicale
ZIMMERN	Physique.

IV. — AGRÉGÉS CHARGÉS DE COURS DE CLINIQUE

à titre permanent

MM.		MM.	
ALGLAVE ..	Clinique chirurgicale.	LÉRI.....	Clinique médicale.
AUVRAY....	Clinique chirurgicale.	MOCQUOT...	Clinique chirurgicale.
CHEVASSU..	Clinique chirurgicale.	PROUST	Clinique chirurgicale.
LAIGNEL-LAVASTINE	Clinique médicale.	SCHWARTZ.	Clinique chirurgicale.
LE LORIER.	Clinique obstétricale.	VILLARET ..	Clinique médicale.
LEREBOULLET	Clinique médicale infantile.		

V. — CHARGÉS DE COURS

MM. MAUCLAIRE, agrégé...	Chargé du cours de chirurgie orthopédique chez l'adulte pour les accidentés du travail, les mutilés de guerre et les infirmes adultes.
FREY.....	Stomatologie.
CHAILLET-BERT.....	Education physique.
LEDOUX-LEBARD....	Radiologie clinique.

Par délibération en date du 9 décembre 1798, l'École a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

A mon maître et président de thèse

M. le Professeur André STROHL

A mes maîtres en électro-radiologie

M. le Docteur DUHEM

M. le Docteur TURCHINI

Digitized by the Internet Archive
in 2025

https://archive.org/details/delamesuredelaco0000mstr

AVANT-PROPOS

L'étude de la résistance électrique du corps humain qui était restée pendant longtemps une curiosité de laboratoire, a pris depuis quelque temps une importance d'ordre beaucoup plus pratique.

Les phénomènes de conduction de l'électricité dans le corps humain sont très complexes. Des travaux récents, notamment les travaux de notre maître, M. le Professeur A. Strohl, ont mis en évidence certains points tels que la constance de la résistance initiale, et l'importance de la polarisation. Ils ont fait faire un grand pas aux connaissances que nous avons sur ce sujet.

Mais bien des points restent encore à éclaircir. Et pourtant il est de nombreuses applications médicales où la connaissance exacte des modalités de passage du courant électrique dans le corps humain rendrait de grands services.

C'est le cas par exemple des méthodes modernes de mesure de l'excitabilité électrique des muscles et des nerfs; la phase d'établissement du courant bref utilisé dans la recherche de la chronaxie ne peut être déterminée que si l'on connait exactement la valeur de la polarisation pour chaque voltage.

De même dans la diathermie, la quantité de chaleur dégagée dans l'intimité des tissus, n'est pas proportionnelle au carré de l'intensité. On ne peut la calculer qu'en connaissant exactement l'impédance et l'angle

de phase du conducteur humain pour la fréquence utilisée.

Enfin les travaux récents de Watermann ont montré que la clinique pouvait tirer parti des recherches sur la polarisation. Il a mis en évidence des modifications de la polarisation dans les tissus néoplasiques.

Malheureusement parmi les diverses techniques que l'on a employées jusqu'à ce jour dans l'étude de la conductibilité du corps humain, il en est un grand nombre dont la précision laisse un peu à désirer.

C'est pourquoi nous avons cherché, dans le laboratoire de M. le Pr. Strohl, à mettre au point une technique nouvelle.

Il ne faudrait certes pas croire que cette technique permet à elle seule de résoudre tous les problèmes relatifs à la conductibilité du corps humain, mais nous avons cherché avant tout à obtenir des résultats précis tout en conservant à notre technique une grande facilité d'application.

CHAPITRE I

Historique

Résistance apparente

Depuis longtemps les médecins ont eu l'occasion d'appliquer des courants électriques au corps humain. Que ce soit dans un but diagnostique ou dans un but thérapeutique, la technique générale est la même; le courant électrique entre dans le corps et il en ressort par des électrodes métalliques. Pour assurer un bon contact entre le métal et la surface cutanée, on interpose un corps hydrophile et spongieux (peau de chamois — amiante — flanelle) imbibé d'une solution d'un électrolyte, en général le chlorure de sodium.

Le conducteur ainsi constitué présente, au point de vue électrique, des particularités assez curieuses, qui le différencient, du moins en apparence, de tous les autres conducteurs.

Lorsqu'on veut mesurer la résistance électrique d'un conducteur, on applique à ses extrémités une force électro-motrice connue E, et l'on mesure l'intensité I du courant qui la parcourt.

La résistance est alors donnée par la formule connue sous le nom de loi d'Ohm:

$$R = \frac{E}{I}$$

Si l'on applique une telle méthode au corps humain, on s'aperçoit que la résistance ainsi définie n'a pas une valeur constante; mais qu'elle varie en fonction d'un grand nombre de facteurs.

1°) La résistance est fonction de la différence de potentiel appliquée entre les deux électrodes Elle diminue avec le voltage.

Exemple: On place deux électrodes de 8 centimètres carrés de surface, l'une à la face palmaire du poignet, l'autre sur le biceps. On applique entre les deux électrodes une différence de potentiel de 5 volts. L'intensité qui passe est alors de 0,1 milliampère. La résistance est donc:

$$R = \frac{5}{0{,}0001} = 50.000 \text{ ohms.}$$

Doublons le voltage en le portant à 10 volts. L'intensité fera plus que de doubler, car elle sera alors de 0,3 milliampère. La résistance est donc devenue:

$$R = \frac{10}{0{,}0003} = 33.000 \text{ ohms}$$

Doublons encore le voltage. Pour 20 volts l'intensité sera alors de 1 milliampère, ce qui correspond à une résistance de 20.000 ohms.

En réalité cette variation de la résistance du corps en fonction du voltage n'est accentuée que pour des voltages relativement élevés. Mais lorsque le courant est très faible — de l'ordre du micro-ampère — le conducteur suit assez bien la loi d'Ohm, c'est-à-dire qu'il y a proportionnalité entre l'intensité du courant et la différence de potentiel aux bornes du sujet.

2°) Un courant électrique parcourant l'organisme fait baisser la résistance du corps. Ce fait est très gênant pour la mesure de cette résistance.

Reprenons en effet l'exemple ci-dessus. Lorsque nous appliquons 20 volts au corps, le courant de l'ordre du milliampère qui le traverse agit sur lui en modifiant sa résistance. On voit en effet l'intensité augmenter d'abord rapidement pendant la première seconde, puis plus lentement; au bout de quelques secondes l'intensité prend une valeur pratiquement fixe.

Quelle valeur admettra-t-on alors pour la résistance du corps humain ? Sera-ce la valeur maxima, juste au moment de la fermeture du courant ? Sera-ce la valeur minima au bout de quelques secondes ?

On voit, par cet exemple, que lorsque l'on veut mesurer la résistance du corps au courant continu, résistance que l'on a coutume d'appeler *résistance apparente,* il est indispensable d'utiliser des courants très faibles.

3°) La résistance électrique du corps humain dépend essentiellement de l'état de la peau. La sudation diminue beaucoup la valeur de cette résistance. Au conraire quand la peau est sèche, la résistance apparente prend une valeur très élevée.

Une expérience très intéressante due à Jolly montre le rôle important que joue la peau et notamment l'épiderme dans la question de la résistance apparente du corps humain. Jolly détruit l'épiderme en appliquant un vésicatoire. Dans ces conditions, on peut remarquer que la résistance apparente baisse considérablement. Elle peut prendre une valeur dix fois plus faible que lorsque la peau est intacte. Cette expérience prouve que le siège principal de la résistance du corps humain se trouve au niveau de l'épiderme. On conçoit alors aisément l'action prépondérante de l'état de sécheresse de la peau sur la valeur de la résistance apparente

4°) La résistance apparente du corps humain est modifiée par des facteurs physiologiques divers.

L'excitation du sympathique, les émotions, le travail intellectuel retentissent sur la résistance apparente du corps humain.

5°) L'application des courants alternatifs de haute fréquence, tels que ceux qui sont utilisés dans la diathermie, fait baisser la résistance du corps. A la vérité ils n'agissent pas par un mécanisme différent de ceux que nous venons d'étudier. La diathermie agit à la fois à cause du courant lui-même et par la sudation que produit l'élévation de température du membre traité.

6°) La résistance dépend enfin essentiellement de la place des électrodes, de leur surface et très accessoirement de la section et de la longueur du segment de corps interposé.

En résumé, la mesure de la résistance du corps humain en courant continu donne une valeur que l'on appelle résistance apparente du corps humain.

Cette résistance a son siège principal dans la peau. Elle dépend du voltage employé.

Deux facteurs principaux la modifient:

1° L'état de la peau, sur lequel on peut agir notamment en provoquant la sudation, en provoquant des phénomènes vaso-moteurs ou en appliquant des vésicatoires.

2° Le passage d'un courant électrique.

L'action de ce dernier facteur a été expliquée par des différentes hypothèses. Actuellement, on tend à admettre que la baisse de la résistance du corps par suite de l'action des courants électriques est due à l'introduction électrolytique des ions dans des milieux tels que les membranes cellulaires, qui en étaient primitivement dépourvus.

Polarisation

Lorsqu'on fait passer un courant dans le corps humain, et qu'on le sépare de la source, si on le met rapidement en communication avec un galvanomètre, on voit que celui-ci est parcouru par un courant de sens inverse au courant initial. Le corps humain se comporte alors comme un accumulateur que le courant aurait chargé.

Du Bois-Reymond étudiant cet effet découvert par *Peltier,* montra que les forces électromotrices ainsi développées dans le conducteur humain, avaient une double origine. Elles proviennent en partie de la polarisation des électrodes, le corps humain ne jouant alors que le rôle de l'électrolyte dans la pile secondaire. Mais de plus, il y a une force contre-électromotrice qui prend naissance au sein même des tissus vivants. A ce dernier phénomène il donna le nom de *polarisation intérieure.*

On voit de suite qu'il est absolument nécessaire, chaque fois que l'on veut étudier ces forces électromotrices de polarisation du corps humain, d'employer des électrodes impolarisables.

Malheureusement les recherches toutes récentes du Professeur *A. Strohl* et *F. Portes* ont montré que toutes les électrodes dites impolarisables présentaient une polarisation qui était loin d'être négligeable.

Leurs recherches ont porté sur les différents types d'électrodes réversibles : électrodes à l'argent — azotate d'argent ; électrodes au cuivre — sulfate de cuivre ; électrodes au nickel — azotate de nickel ; électrodes au zinc — sulfate de zinc; électrodes à l'or — chlorure d'or; électrodes au calomel.

Ces recherches ont montré que la force contre-électromotrice de polarisation des électrodes variait toujours de la même façon en fonction du temps pour diverses intensités du courant polarisant.

Il faut donc toujours tenir compte de la polarisation des électrodes, lorsqu'on étudie la polarisation du corps humain.

On peut mettre en évidence les courants de dépolarisation du corps humain par des expériences physiologiques.

Laraf et *Onimus,* par exemple, ont montré que les courants obtenus sur l'homme sont capables de provoquer la contraction d'un muscle de grenouille.

Plus récemment en collaboration avec *Ph. Fabre* et *H. Desgrez,* nous avons montré qu'en réunissant les électrodes à l'aide d'un shunt de faible résistance, on provoque une contraction musculaire très intense.

De nombreux auteurs se sont occupés de la mesure des forces électromotrices de polarisation du corps humain. Les méthodes employées dérivent presque toutes de celle qu'utilisa le premier *Hermann.*

Le principe général de cette méthode était le suivant:

Il faisait passer dans le corps humain un courant d'intensité connue. Puis immédiatement après, il mesurait la différence de potentiel aux bornes du sujet. Cette mesure s'effectuait par une méthode d'opposition.

Malheureusement la polarisation disparaît très rapidement et Hermann effectuait ses mesures un temps trop long après que le courant polarisant avait cessé de passer. De sorte qu'il n'a pu mettre en évidence que des forces électromotrices de polarisation très faibles, n'atteignant pas le demi-volt.

Weiss puis *Chanoz* ont repris ces expériences. Mais on peut faire à leur technique le même reproche qu'à celle d'Hermann. C'est pourquoi ils ont été amenés à

admettre comme valeur de la polarisation des chiffres beaucoup trop faibles.

E. David obtint des chiffres plus élevés, grâce à une technique plus rigoureuse. Dans une première série de recherches, il employa un diapason donnant 50 oscillations par seconde et dont l'une des branches mettait alternativement le sujet en relation d'une part avec la source de courant, d'autre part avec un réducteur de potentiel.

Il employa également un interrupteur rotatif.

Enfin sa dernière technique était beaucoup meilleure; il utilisait un pendule de Helmholtz qui manœuvrait les différents contacts. Il pouvait mesurer la différence de potentiel aux bornes du sujet un cent-millième de seconde seulement après l'ouverture du courant polarisant. Il a trouvé ainsi des forces contre-électromotrices de 8 à 9,5 volts pour une tension polarisante de 10 volts.

Déjà quelque temps auparavant le Pr. *A. Strohl* avait obtenu des résultats supérieurs à ceux de David.

A la place du pendule de Helmholtz il employait un interrupteur automatique auquel il a donné le nom d'égersimètre. Cet appareil qui est actuellement employé d'une manière courante dans la mesure de la chronaxie chez l'homme, se compose d'une masse métallique mobile le long d'un axe vertical. Cette masse en tombant rompt des contacts dont on règle l'écartement par une vis micrométrique. A l'aide de cet appareil on peut obtenir facilement des passages de courant d'une durée inférieure au dix-millième de seconde, et avec une très grande approximation.

L'importance de ces travaux, dans lesquels nous avons d'ailleurs beaucoup puisé, est très grande, car ils ont apporté de profondes modifications à nos connaissances relatives à la polarisation du corps humain.

Aussi nous croyons indispensable de citer ici les conclusions de la thèse de Sciences du Pr. A.Strohl:

1. — L'étude, au moyen d'un galvanomètre balistique, du passage d'un courant traversant le corps humain sous un voltage constant, nous a permis de mettre en évidence des modifications importantes de l'intensité de ce courant dès les premiers instants qui suivent la fermeture du circuit.

1°) Ces modifications ne sont pas dues à des actions siégeant au niveau des électrodes.

Elles sont imputables en effet au corps humain. Si on les rapporte à un changement dans la résistance électrique apparente de ce dernier, on est amené à considérer séparément deux phases dans le passage du courant.

2°) Pendant la première, qui est ordinairement de l'ordre de quelques millièmes de seconde, la résistance apparente croît jusqu'à une valeur maxima, pour diminuer ensuite, d'abord assez rapidement, puis de plus en plus lentement.

La valeur maxima peut atteindre un chiffre deux à cinq fois plus grand que celui qui exprime la grandeur de la résistance pour une durée de quelques secondes.

3°) Lorsque le voltage augmente, la résistance décroît toujours, quel que soit l'instant considéré; de plus, l'amplitude de ses variations diminue également. La position du maximum change aussi avec le voltage et est d'autant plus rapprochée de l'origine que ce dernier est plus élevé. Par contre, elle s'éloigne de l'origine quand on augmente, toutes choses restant égales, la grandeur des résistances additionnelles.

4°) La différence des résistances pour deux voltages croît, au moins entre certaines limites, avec la durée d'action du courant. Il en est de même du rapport de la plus grande résistance à la plus petite.

5° Si, pour rendre compte des phénomènes observés on suppose l'existence d'une force contre-électromotrice de polarisation, celle-ci doit croître avec le temps jusqu'à une certaine valeur maxima de 10 à 20 volts, pour diminuer ensuite.

II. — A l'aide d'un dispositif automatique approprié on peut déterminer, par la méthode d'opposition, la valeur de la force électromotrice existant entre les électrodes, un temps très court (quelques cent-millièmes de seconde) après la cessation du courant polarisant.

1°) La force contre-électromotrice de polarisation ainsi observée se trouve être du même ordre de grandeur que celle déduite des mesures balistiques, c'est-à-dire beaucoup plus élevée qu'on ne le supposait jusqu'à présent.

2°) Elle croît avec la durée du passage du courant jusqu'à une valeur maxima, pour diminuer ensuite de plus en plus lentement.

3°) Lorsque l'intensité du courant augmente, il y a tout d'abord augmentation de la valeur maxima, qui croît cependant moins vite que l'intensité et déplacement du maximum vers l'origine des temps.

4°) Le rapport de la force contre-électromotrice maxima au voltage de la source est d'autant plus élevé que la résistance du circuit est moindre et que le voltage avec lequel est émis le courant polarisant est plus faible.

5°) La baisse de la polarisation après le maximum est d'autant plus lente que le rapport précédent est plus faible.

6°) Au-delà d'une certaine valeur de l'intensité, la polarisation n'augmente plus sensiblement; seule la rapidité d'apparition du maximum continue à croître. Cette limite supérieure de la polarisation est d'autant

plus élevée et a lieu pour des courants d'autant plus forts que les électrodes sont plus larges.

7°) A densité égale de courant, la polarisation est d'autant plus accusée que les électrodes sont plus larges.

8°) L'ensemble des tissus traversés par le courant contribue à produire la polarisation, mais la peau joue, à ce point de vue, un rôle prépondérant.

9°) Lorsque le courant a cessé d'agir, la polarisation se détruit très rapidement. Cette décroissance n'a pas lieu, comme les décharges de condensateur, suivant une fonction exponentielle.

Par rapport à celle-ci, on peut considérer la vitesse de décroissance comme allant progressivement en se ralentissant.

III. — En déterminant, par une technique analogue à la précédente, la différence de potentiel minima existant entre les extrémités d'un sujet, mis en série avec une résistance connue et parcouru par un courant continu, on peut calculer la résistance initiale du corps humain.

1°) Cette résistance est beaucoup plus faible que la résistance apparente, déterminée par application de la loi d'Ohm pour de longues durées d'action du courant.

2°) Elle semble peu influencée par le passage du courant et les variations de voltage de la source. Elle se comporte donc, en première approximation, comme une résistance électrolytique.

IV. — La polarisation des tissus, en provoquant des variations considérables d'un courant émis sous un voltage constant, est une source de difficultés pour la mesure de l'excitabilité électrique.

Parmi les modifications qu'entraîne la polarisation dans les facteurs des courants donnant le seuil d'excitation, deux sont particulièrement accusées.

1°) La quantité d'électricité produisant l'excitation,

dans un temps donné, est d'autant plus petite que l'importance relative de la polarisation par rapport au voltage d'excitation est plus grande.

2°) La mesure de la chronaxie est ordinairement entachée d'une erreur par défaut d'autant plus considérable que l'importance relative de la polarisation est plus grande.

V. — 1°) Si l'on mesure les quantités d'électricité nécessaires pour amener un certain degré de polarisation pris comme seuil dans des temps différents, on constate que ces quantités croissent, avec les durées d'action, suivant une fonction sensiblement linéaire, semblable à la loi de Weiss pour l'excitation.

2°) Le calcul, d'après cette relation, de la grandeur qui serait l'analogue de la chronaxie, donne un chiffre du même ordre de grandeur que la chronaxie des muscles squelettiques de l'homme.

3°) Si l'on augmente la valeur de la polarisation choisie comme seuil, on observe une diminution de la durée correspondant à la chronaxie.

VI. — 1°) La polarisation doit être due à une accumulation d'ions à la surface de membranes vivantes douées d'une perméabilité ionique très inégale suivant les différentes substances.

2°) Dans l'état actuel de nos connaissances, toutes les hypothèses que l'on peut émettre, pour essayer de préciser les conditions de cette polarisation, la nature des capacités où s'accumule l'électricité, leurs relations avec les résistances intérieures, ainsi que les différents schémas proposés dans le même but, ne peuvent être discutés utilement faute d'une base expérimentale assez solide.

3°) La perméabilité sélective des membranes, dont dépend la polarisation, est liée à l'intégrité vitale des tissus et disparaît (au moins en majeure partie) avec

elle. Sur le vivant, elle est influencée par le système nerveux, probablement végétatif.

A ce point de vue, l'on doit considérer la mesure de la force contre-électromotrice de polarisation, ainsi que celle de la résistance initiale, comme pouvant constituer d'utiles modes d'exploration de certaines fonctions organiques.

Nous avons tenu à donner ici in-extenso les conclusions du Pr. A. Strohl, car elles forment un tout homogène.

L'intérêt de ces travaux est considérable, car ce sont eux qui ont montré l'énorme importance des forces contre-électromotrices qui prennent naissance dans le corps humain; jusque-là on leur assignait une valeur de quelques volts. Les travaux du Pr. A. Strohl ont montré que leur valeur était beaucoup plus considérable et qu'elle pouvait atteindre les 95 centièmes du voltage appliqué au corps humain.

Résistance initiale

L'existence de la polarisation a amené à considérer que la résistance électrique du corps humain au courant continu, autrement dit le rapport du voltage à l'intensité, ne représente en réalité qu'une résistance apparente.

Si l'on applique 10 volts au corps humain, 9 ou 9,5 volts seront absorbés par la polarisation et la chute ohmique de potentiel le long des tissus ne sera que de 0,5 ou 1 volt. Nous avons donc, en appelant V la différence de potentiel aux bornes du sujet, I l'intensité qui le parcourt, E la force électro-motrice de polari-

sation et R un facteur ayant les dimensions d'une résistance:

$$V = E + RI$$

A ce facteur R on a donné le nom de *résistance vraie* ou de *résistance initiale* du corps humain.

On voit donc que toutes les mesures de la force électro-motrice de polarisation peuvent fournir une mesure de la résistance initiale.

Mais les mesures effectuées par ces méthodes d'opposition fournissent une valeur de la polarisation approchée par défaut. Elles conduisent donc pour la résistance initiale à une valeur approchée par excès.

Parmi les auteurs qui s'attaquèrent directement à la mesure de la résistance initiale, *Hermann* le premier pensa qu'il était nécessaire d'utiliser des courants alternatifs d'une fréquence telle que la force contre-électromotrice n'ait pas le temps d'acquérir une valeur notable.

C'est qu'en effet les mesures de polarisation lui avaient montré que, si celle-ci met un certain temps (toujours très court d'ailleurs) à disparaître, elle n'apparait pas d'une manière instantanée.

Il employa le courant secondaire d'une bobine d'induction dont le courant primaire était interrompu 1.500 fois par seconde. Ses résultats et sa technique sont d'ailleurs loin d'être irréprochables.

Plus récemment de nombreux auteurs ont repris la question avec des techniques plus satisfaisantes: — Celles-ci peuvent se grouper en deux grandes classes, suivant que le courant utilisé était du courant faradique ou du courant alternatif sinusoïdal.

Mesure en courant faradique

Kundt et *Kohlrausch* furent les premiers à employer sur le corps humain la méthode du pont de Kohlrausch.

Le sujet forme une des branches d'un pont de Wheastone, dont les trois autres sont formées, l'une par une résistance fixe, et les deux dernières par un fil résistant AB que l'on appelle la corde. Le pont est alimenté en courant faradique par une bobine, ou en courant interrompu par un buzzer.

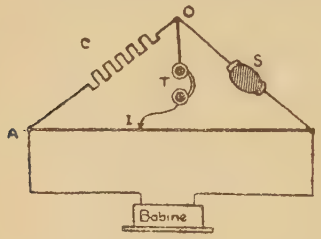

fig. 1

Pont de Kohlrausch : C résistance fixe ; S résistance à mesurer ; AB corde ; T téléphone.

Un téléphone est branché sur l'autre diagonale du pont ; le silence est obtenu pour une certaine position du curseur I.

La résistance ainsi mesurée a une valeur beaucoup plus faible que la résistance apparente en courant continu.

Gildemeister employa la même méthode ; mais, voulant surtout mesurer la polarisation, il faisait passer dans le corps, en outre du courant faradique, un courant continu qui, tout en n'influant pas sur les mesures du pont, lui permettait de mesurer la résistance apparente.

Ayant ainsi directement mesuré V, R et I, il en déduisait facilement la polarisation E.

$$E = V - RI$$

Galler par la même méthode mit en évidence des forces contre-électromotrices de 2 volts pour une tension extérieure de 8 volts.

Mesures en courant alternatif

Gildemeister voulut améliorer la méthode de Kohlrausch en employant des fréquences plus élevées, pour approcher de plus près la résistance initiale.

A cet effet il employa une machine à courant alternatif, puis une lampe Poulsen. Il obtenait ainsi des fréquences de 500 à 6.000.

Pour améliorer le minimum perceptible au téléphone, il plaçait en série avec le corps humain une bobine de self variable à noyau de fer.

Enfin, le téléphone devenant peu sensible aux fréquences élevées, il employa comme appareil de zéro, un galvanomètre mis en série avec un détecteur.

Il obtint par cette méthode des valeurs de la polarisation plus élevées que celles qu'on avait jusqu'alors mis en évidence. Chez l'homme, il trouva jusqu'à 6,6 volts.

Philippson utilisa des fréquences beaucoup plus élevées — jusqu'à 3.000.000 périodes. Il les obtenait à l'aide d'une hétérodyne de T. S. F.

Il n'employait pas de pont de Wheastone. Il mettait en série avec le corps humain une résistance variable.

Il reconnaissait que les résistances étaient égales lorsqu'un indicateur de tension alternative placé successivement aux bornes du corps humain et de la résistance variable, donnait les mêmes indications.

Cet indicateur était le voltmètre amplificateur d'Abraham.

Il a pu mettre en évidence une diminution constante de la résistance quand on élève la fréquence du courant alternatif.

Einthoven et *Bijtel* ont étudié la résistance du corps

humain au moyen de courants alternatifs de basse et de haute fréquence et par l'enregistrement avec un galvanomètre à corde de la phase d'établissement d'un courant continu dans le corps humain.

Ils ont conclu d'après l'examen des courbes enregistrées et des nombres trouvés au moyen du courant alternatif, qu'il y a lieu de considérer le corps humain comme équivalent à une résistance dite intérieure relativement faible, inférieure à un millier d'ohms, en série avec une capacité de 6 à 15 millimicrofarads par centimètre carré de peau; cette capacité étant shuntée par une résistance de peau, d'une centaine de mille ohms environ. Ces résistances et cette capacité varient avec la dimension et l'emplacement des électrodes.

Enfin tout récemment *Watermann* utilisant un pont en courant alternatif de basse fréquence (200 à 380), obtient une mesure de la résistance de fragments de tissus humains. Pour cela il met en série avec le corps humain une bobine de self variable. Il évalue la polarisation d'après la valeur de la bobine de self qui compense exactement le déphasage dû à la réactance de capacité du corps humain.

Il mesure ainsi le rapport $\frac{P}{W}$ autrement dit $\frac{\text{Polarisation}}{\text{Widerstand}}$.

Ce rapport varie suivant que les électrodes sont imbibées de solution physiologique ou de solution de Chlorure de Calcium.

Dans ce dernier cas on obtient un rapport plus faible pour les tissus néoplasiques que pour les tissus sains.

Ce rapport $\frac{P}{W}$ n'est autre que le rapport de la tangente de l'angle de phase à la pulsation.

CHAPITRE II

De l'impédance du corps humain

Dès lors que l'on utilise un courant alternatif pour la mesure de la résistance du corps humain, on doit subsistuer à la notion de résistance, celle d'*impédance*.

Or, les travaux des différents expérimentateurs et notamment ceux de Gildemeister, ont montré que l'impédance diminue avec la fréquence. On peut donc dire que le corps humain présente une *réactance de capacité*. La différence de potentiel aux bornes du corps humain est déphasée en arrière d'un certain angle, par rapport à l'intensité du courant excitateur.

Notation imaginaire

Il y a intérêt à se servir pour les divers calculs sur l'impédance, de la notation imaginaire.

Elle fait intervenir un facteur $\mathcal{R}$ que l'on appelle résistance imaginaire, parce qu'il contient le terme $= \sqrt{-1}$ Les résistances imaginaires se traitent dans les calculs comme des résistances ohmiques.

La résistance imaginaire est de la forme :

$$\mathcal{R} = a + bj$$

L'impédance Z est alors égale au module:

$$Z = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Et l'angle de phase, c'est-à-dire l'angle dont est décalé le voltage par rapport à l'intensité est donné par

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$$

On appelle *argument* l'angle φ.

Puisque dans le corps humain la tension est en retard sur l'intensité, il faut admettre que l'angle φ est négatif; donc le terme tg φ est lui-même négatif. Comme a est nécessairement positif, c'est que b est négatif. Le terme imaginaire du corps humain est donc négatif.

Mesure d'une impédance par le pont de Wheastone

Les quatre branches du pont sont respectivement représentées par deux conducteurs P et Q d'impédance fixe, un conducteur R variable en impédance et en phase, et le corps humain d'impédance Z.

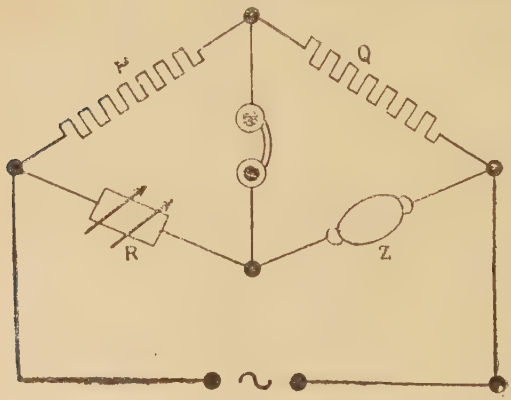

fig. 2

Pont de Wheastone en alternatif; P, Q, résistances fixes; R, conducteur variable en impédance et en phase; Z, impédance à mesurer.

En général, P et Q sont des résistances ohmiques pures. Les résistances imaginaires des quatre branches sont respectivement égales à $\mathscr{P}\mathscr{Q}\mathscr{R}$ et $\mathscr{Z}$. Le silence est obtenu au téléphone, lorsque l'on a:

$$\frac{\mathscr{P}}{\mathscr{R}} = \frac{\mathscr{Q}}{\mathscr{Z}} \text{ c. à d. } \frac{P}{\mathscr{R}} = \frac{Q}{\mathscr{Z}}$$

Critique des techniques précédentes

Le pont de Kolrausch utilise du courant faradique. Ce courant périodique est composé d'une suite d'ondes brèves séparées par des repos. On peut le décomposer en une série de Fourier. Autrement dit, on peut le considérer comme la superposition d'une infinité de courants alternatifs sinusoïdaux de fréquences respectivement égales à T, $\frac{T}{2}$, $\frac{T}{3}$, $\frac{T}{4}$, etc..., T étant la période du courant faradique.

Ces différentes composantes seront inégalement déphasées, puisque l'angle de phase dépend de la période. Les 3 autres branches du pont sont constituées par des résistances ohmiques pures. Le potentiel du point I (fig. n° 1) est donc en phase avec le courant, tandis que celui du point C n'est pas en phase. Il n'y aura donc qu'un minimum d'audition au téléphone et non un silence. Ce minimum ne sera net que si le déphasage dû à la réactance de S est petit. Le pont de Kolrausch ne convient donc qu'à la mesure de l'impédance des conducteurs dans lesquels l'argument est faible. Or, ce n'est pas le cas du conducteur humain.

De plus, il est difficile d'obtenir des fréquences élevées en courant faradique; et la sensation désagréable qu'il provoque risque de faire bouger le sujet; et son immobilité est, comme nous le verrons absolument nécessaire. Enfin le téléphone est relativement peu sensible au courant faradique; et il est impossible de déterminer l'intensité employée.

Bien meilleure est la seconde technique de Gildemeister qui emploie un courant alternatif sinusoïdal.

Pour annuler le déphasage dû à la réactance de ca-

pacité du corps humain, il met en série avec lui une bobine de self variable.

La résistance imaginaire de l'ensemble est alors égale à la somme des résistances imaginaires de la bobine de self et du corps humain.

Cette dernière est de la forme:

$$\mathcal{R} = a + bj$$

expression dans laquelle b est négatif.

La résistance imaginaire de la bobine de self est (en négligeant sa résistance):

$$\mathcal{R}' = jL\omega$$

La résistance totale sera:

$$\mathcal{R}'' = a + bj + jL\omega = a + j(b + L\omega)$$

En faisant $L = -\frac{b}{\omega}$ on annule le terme imaginaire donc l'angle de phase. Et l'on peut obtenir le silence du téléphone. Malheureusement Gildemeister employait une bobine à noyau de fer, dont le coefficient de self induction L est mal déterminé et dépend de l'intensité.

Phillipson en utilisant des courants de haute fréquence s'est heurté à des difficultés d'un autre ordre. Pour des fréquences aussi élevées il est très difficile d'obtenir des résistances étalons, sans self ni capacité. De plus la résistance elle-même est très mal définie. Il intervient alors un phénomène nouveau le skin-effect; la conductibilité se localise de plus en plus à la surface à mesure que l'on élève la fréquence. De sorte que la résistance augmente avec la fréquence. Si l'on emploie des résistances étalons de nature électrolytique, l'inertie des ions intervient alors pour modifier considérablement leur conductance.

CHAPITRE III

Mesure de l'impédance du corps humain

Il nous est donc apparu que pour obtenir des chiffres certains il était nécessaire d'employer des courants alternatifs sinusoïdaux de basse fréquence.

La méthode à laquelle nous nous sommes adressés est la méthode de Wien qui sert en électricité à l'étude des conducteurs présentant une réactance de capacité, avec un argument élevé.

Technique

Oscillateur

Le courant alternatif est produit par un oscillateur à triodes comprenant deux valves: une oscillatrice et une lampe de couplage.

L'*oscillatrice* est du type à couplage mixte; c'est-à-dire que la réaction entre le circuit de plaque et le circuit de grille, est à la fois électrostatique (couplage par le condensateur d'accord) et électromagnétique (couplage par l'auto-transformateur que constitue la self d'accord).

La lampe oscillatrice peut être d'un modèle quelconque Radiotechnique R 36 ou Philipps A. 410 ou B. 406.

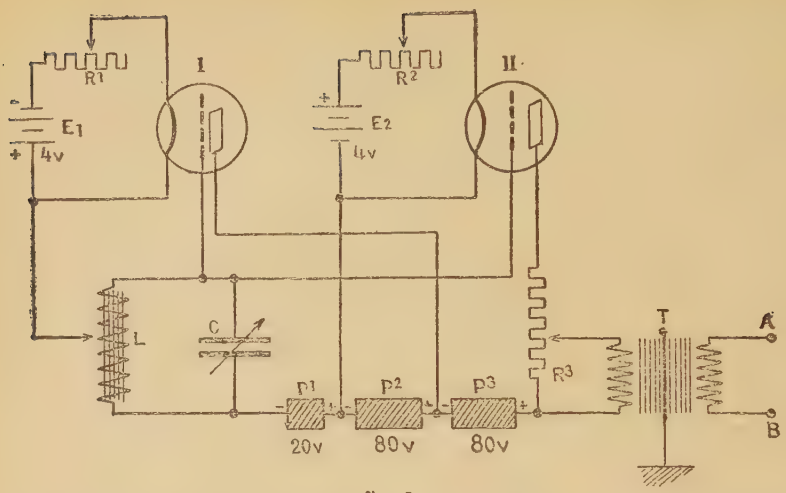

fig. 3

Oscillateur de basse fréquence à triode : I, triode oscillatrice (B. 406) ; II, triode de couplage (B. 403) ; E_1, E_2, accumulateurs de chauffage ; R_1, R_2, rhéostats de chauffage des filaments ; L, self à fer ; C, condensateur variable à plots ; P_1, P_2, P_3, batterie d'accumulateurs de tension de plaque ; R_3, résistance shunt variable ; T, transformateur à cran ; AB, bornes reliées au pont.

La *self d'accord* comprend 6.000 spires bobinées sur un noyau de fer doux.

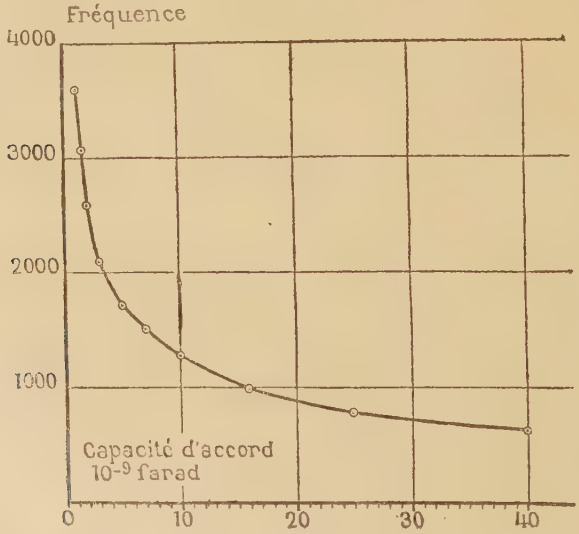

fig. 4

Variation de la fréquence émise par l'oscillateur en fonction de la capacité d'accord du circuit oscillant.

Une manette permet de faire varier la *capacité d'accord* depuis 1.10^{-9} farad jusqu'à 40.10^{-9} farad. On dispose ainsi d'une gamme de 10 fréquences s'échelonnant entre 3.500 et 600 environ.

La *lampe de couplage* est destinée à empêcher les variations d'impédance du circuit d'utilisation de réagir sur l'oscillatrice et de modifier la fréquence des oscillations qu'elle produit.

Nous avons donc employé comme lampe de couplage une lampe de puissance, la B. 403 Philipps Sur son circuit de plaque se trouve le primaire d'un transformateur à écran électrostatique mis au sol, shunté par une résistance variable de 600 ohms.

Un tel oscillateur donne un courant alternatif dont la fréquence est absolument indépendante de l'utilisation, et dont les harmoniques ont trop peu d'intensité pour empêcher l'obtention d'un bon zéro au téléphone.

La fréquence donnée par l'oscillateur dépend de l'intensité du courant de chauffage de l'oscillatrice; et il dépend de la température de la triode. De sorte que ce n'est qu'au bout d'un certain temps, environ une demi-heure, que la température de la lampe a atteint un régime permanent et que les fréquences émises par l'oscillateur deviennent stables. Il convient donc de mettre l'oscillateur en route une demi-heure avant de commencer les mesures, ou bien de faire une mesure de la fréquence utilisée avant chaque mesure d'impédance.

L'appareil de mesure est un pont de Wheastone.

Il est indispensable d'éloigner ce pont de l'oscillateur; le voisinage de celui-ci est le siège d'un champ alternatif intense qui induit, sans cette précaution, dans toutes les branches du pont des courants qui faussent les mesures et qui empêchent même souvent d'obtenir l'extinction au téléphone. Sur deux branches

se trouvent deux résistances fixes de 1.000 ohms; et sur les autres branches, d'une part le corps humain et d'autre part une résistance étalon variable à plots de 10.000 ohms en série ou en parallèle avec un condensateur étalon variable à plots de 1 micro-farad. En parallèle avec ce dernier se trouve un condensateur vernier, variable à air de 1.10^{-9} farad.

Dans la diagonale d'écoute est placé l'espace filament grille d'un triode qui est la première d'un amplificateur à lampes à trois étages; le premier à résistance et les deux autres à transformateur.

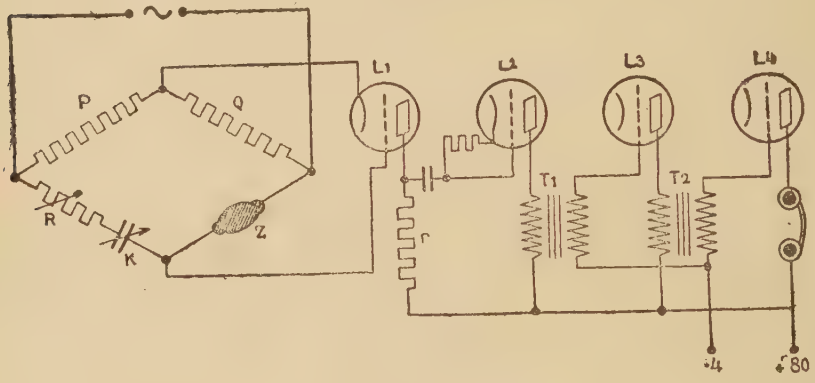

fig. 5

Pont alternatif avec amplificateur d'écoute: P Q R K Z, pont de Wheastone; L_1, L_2, L_3, L_4, triodes amplificatrices: r. résistance de l'étage à résistance: T_1, T_2, transformateurs de basse fréquence; T, téléphone d'écoute.

Sur la plaque de la dernière lampe se trouve le téléphone d'écoute.

Cet amplificateur permet d'effectuer des mesures assez précises, tout en n'admettant dans le corps humain qu'un courant d'intensité relativement faible.

Ces différents éléments sont groupés à l'aide d'une table de commande, comportant deux inverseurs A et B.

L'inverseur A permet de placer le corps et le conducteur d'impédance variable, soit sur des branches

homologues (mesure de réactances de capacité) soit sur des branches opposées (mesure de réactances de self-induction).

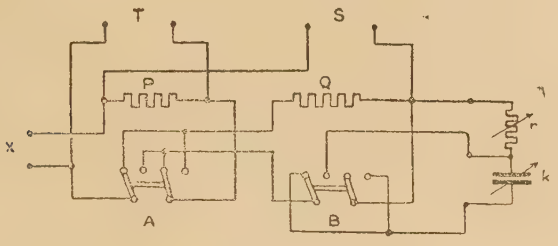

fig. 6

Table de commande du pont.

L'inverseur B permet de placer le condensateur en série ou en parallèle avec la résistance variable. Il est nécessaire de choisir l'une ou l'autre position de l'inverseur B suivant que l'argument de l'impédance à mesurer a une valeur forte ou faible. Dans nos mesures nous utiliserons la position A droite — B gauche. C'est la méthode connue sous le nom de Wien — série; et qui convient aux réactances de capacités à argument élevé.

Électrodes

Un fait qui se dégage nettement des mesures effectuées sur le corps humain par cette méthode est la grande influence des mouvements du sujet sur la valeur de l'impédance. Dans bien des cas il nous est arrivé d'entendre au téléphone une variation de l'intensité du son perçu, variation synchrone au pouls du sujet. Lorsqu'on a réglé le pont à l'extinction, on voit cet équi-

libre rompu à chaque systole. De plus la pression des électrodes sur la peau fait varier l'impédance.

Il est donc indispensable d'assurer la plus grande immobilité du sujet et d'avoir des électrodes très bien fixées sur le corps du sujet.

Pour pouvoir étudier l'influence de la surface des électrodes sur l'impédance il nous a fallu employer des électrodes de surface très bien définie.

Nous avons donc été amenés à construire des électrodes circulaires en ébonite tournée. Au fond du cylindre d'ébonite se trouve une plaque métallique soudée à la base d'une borne par laquelle arrive le courant. Pour éviter d'introduire des capacités de polarisation des électrodes, nous avons employé des plaques d'argent recouvert électrolytiquement d'un dépôt de chlorure d'argent.

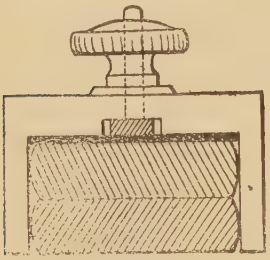

fig. 7
Coupe des électrodes à l'argent chloruré.

L'espace compris entre la plaque d'argent et la peau est comblé par deux tampons d'amiante entourée de gaze et imbibée d'une solution de chlorure de sodium.

L'électrode est fixée au corps par une sangle percée d'un trou à travers lequel passe la borne.

Nous disposions ainsi de quatre jeux d'électrodes circulaires dont les diamètres en centimètres et les sections en centimètres carrés sont données par le tableau suivant :

TABLEAU I

Diamètre en cm.	Surface en cmq.
1,78	2,5
2,52	5
3,19	8
3,99	12,5

Nous avons également construit deux petites électrodes rectangulaires de 0,75 × 2 cm. — soit 1,5 cmq de surface — du même modèle que les précédentes, mais en gutta-percha moulée.

Enfin nous avons aussi utilisé une grande électrode en argent chloruré de 20 × 20 cm.

Pour mesurer la résistance de ces diverses électrodes, nous avons appliqué l'une sur l'autre deux électrodes identiques; la mesure a été faite par le pont de Wheastone en courant continu, les résistances ainsi mesurées étaient environ de:

TABLEAU II

Surface d'électrode en cmq	Résistance en ohms
12,5	35
8	60
5	45
2,5	80
1,5	80

Mesure de la fréquence employée

On peut mesurer la fréquence par comparaison acoustique avec des diapasons étalonnés.

Cette méthode nécessite une interpolation où le facteur personnel joue un rôle dont il est difficile de définir la précision.

Il est préférable d'employer une méthode électrique en se servant du pont lui-même.

On dispose à la place du corps humain une résistance r en parallèle avec un condensateur k. L'extinction est obtenu au téléphone lorsque les résistances imaginaires $\mathscr{R}$ et $\mathscr{R}'$ des deux branches Z et Z' sont égales.

On a alors: $\frac{\mathcal{R}}{\mathcal{R}'} = 1$

c'est-à-dire $\left(R - \frac{j}{K\omega}\right)\left(\frac{1}{r} - \frac{k\omega}{j}\right) = 1$

ou $\frac{R}{r} - \frac{Rk\omega}{j} - \frac{j}{K\omega r} + \frac{k}{K} = 1$

$$j\frac{R}{r} + j\frac{k}{K} - Rk\omega + \frac{1}{K\omega r} = j$$

Egalons les parties réelles:

$$Rk\omega = \frac{1}{K\omega r}$$

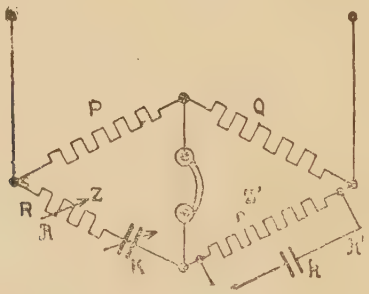

fig 8

Dispositif employé pour la mesure des fréquences utilisées.

$$\omega^2 = \frac{1}{KRkr}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{KRkr}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{KRkr}}$$

Les parties imaginaires donneraient:

$$\frac{R}{r} + \frac{k}{K} = 1$$

Expression qui permet de vérifier l'exactitude de la mesure.

Pratiquement la résistance r est constituée par une boîte de résistance de 696 ohms à 1 ohm près. Sa capacité répartie est de $0{,}79.\ 10^{-9}$ farad $\pm\ 0{,}04.\ 10^{-9}$.

La capacité k a une valeur de:

$$0{,}5075,\ 10^{-6}\ \text{farad} \pm 0{,}5\ 10^{-9}$$

Nous admettrons donc pour valeur de r et k:

$$r = 696\ \text{ohm} \pm 1$$

$$k = 0{,}5083\ 10^{-6}\ \text{farad} \pm 0{,}5.\ 10^{-9}$$

Les erreurs relatives commises sur la mesure de ces deux facteurs sont:

$$\frac{\Delta r}{r} = \pm\ 10^{-3}$$

$$\frac{\Delta k}{k} = \pm\ 1{,}5.\ 10^{-3}$$

Ces erreurs seront souvent négligeables devant les erreurs commises sur R et K.

Calcul d'erreur sur la fréquence

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{KRkr}}$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{2}\frac{\Delta K}{K} + \frac{1}{2}\frac{\Delta R}{R} + \frac{1}{2}\frac{\Delta k}{k} + \frac{1}{2}\frac{\Delta r}{r}$$

Exemple de mesure de fréquence

Expérience n° 20 (Dernière mesure)

Oscillatrice B. 406. Capacité d'accord 26.10^{-9} farad.

Le silence au téléphone est obtenu pour:

$$R = 191\ \text{ohm} \pm 1 \quad \text{d'où} \quad \frac{\Delta R}{R} = 5{,}2.10^{-3}$$

$$K = 699{,}5\ 10^{-9}\ \text{f.} \pm 10^{-9} \quad \text{d'où} \quad \frac{\Delta K}{K} = 1{,}3.\ 10^{-3}$$

La fréquence est donc:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{699{,}5.\ 10^{-9} \times 191 \times 508{,}3 \times 10^{-9} \times 696}} = 732$$

L'erreur relative sur f est donc:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{699{,}5} + \frac{1}{191} + 10^{-3} + 1{,}5.\ 10^{-3} = 9 \times 10^{-3}$$

f est donc connu au $\frac{1}{100}$ près

d'où $\Delta f = 732 \times 9 \times 10^{-3} = 7$

f est donc compris entre 725 et 739.

Mesure de l'intensité du courant utilisé

L'intensité du courant traversant le corps humain lors des mesures est assez difficile à mesurer, car elle est faible; en effet elle n'atteint pas 1 milliampère efficace.

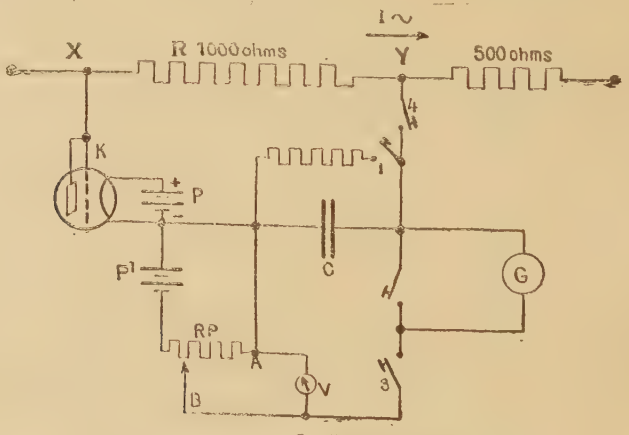

fig. 9

Dispositif employé pour la mesure de l'intensité du courant alternatif employé dans les mesures d'impédance : C, condensateur; K, triode utilisée comme kénotron; R P, réducteur de potentiel alimenté par les deux éléments d'accumulateur P'; V, voltmètre ; G, galvanomètre.

Nous avons substitué au corps humain un conducteur de même impédance que lui et nous avons mesuré le voltage maximum aux bornes d'une fraction de cette impédance. Pratiquement ce conducteur se composait d'une résistance de 1.500 ohms d'un angle de phase négligeable (fig. 9). Nous mesurions la différence de potentiel aux bornes d'une résistance de 1.000 ohms dont l'angle de phase pour la fréquence la plus élevée n'était que de:

$$\text{tg } \varphi = 7{,}9 \times 10^{-3}$$

ce qui est négligeable.

Un condensateur C est chargé au potentiel de crête, grâce à la triode K, utilisée en kénotron, en reliant la grille à la plaque.

On mesure la charge de condensateur par une méthode d'opposition en le reliant par la clef 3, à un galvanomètre G, avec en série un réducteur de potentiel RP capable de donner une différence de potentiel de 2 volts.

Dans ces conditions si la charge du condensateur est supérieure à $V_A - V_B$ un courant de charge passe dans le galvanomètre. Dans le cas contraire c'est un courant de sens inverse.

On arrive rapidement par tâtonnements à équilibrer la charge du condensateur de façon que le galvanomètre n'accuse aucune déviation lorsqu'on ferme la clef 3. La charge du condensateur est alors égale à $V_A - V_B$ — que l'on peut lire directement avec un voltmètre V sensible gradué en 1/50 de volt.

— Il y a une correction à faire du fait que les caractéristiques des kénotrons ne partent pas de l'origine. En effet si l'on réunit la plaque d'un kénotron au pôle négatif du filament, on voit qu'il y a un certain courant de plaque. Pour annuler ce courant il faut porter la plaque à un certain potentiel négatif $-v$.

Si donc on effectue une mesure du voltage de charge du condensateur lorsqu'aucun courant ne passe dans la résistance R, on trouve que le condensateur est chargé à $+v$ volts.

L'on aura donc:

$$[Vx - Vy] \text{ max.} = V_A - V_B - v$$

Pour v nous avons trouvé 0,25 volt.

Voici le résultat de trois mesures: — (oscillatrice A. 425)

TABLEAU III

	Plots	f	$(V_A - V_B)$	(Vx — Vy) max	I. éff.
I	1	2.468	0,90 volt	0,65 volt	$0,45.\ 10^{-3}$ Amp.
II	5	1.428	1,15	0,90	$0,64.\ 10^{-3}$
III	10	523	1,35	1,10	$0,78.\ 10^{-3}$

Les courants utilisés dans cette méthode sont donc inférieurs au milliampère.

Mesure d'une impédance et d'un angle de phase

En considérant les résistances imaginaires des quatre branches, on obtiendra le silence du téléphone lorsque l'on aura la relation:

$$\frac{P}{Q} = \frac{R - \frac{j}{K\omega}}{a + b\,j}$$

$a + bj$ étant la résistance imaginaire du corps humain et ω la pulsation du courant alternatif employé.

On sait qu'on a $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

D'où $R - \frac{j^2}{K\omega} = a + b\,j$

En égalant les parties réelles, puis les parties imaginaires, on obtient:

$$a = R$$

$$b = -\frac{1}{K\omega}$$

L'impédance du corps humain sera donc:

$$Z = \sqrt{R + \frac{1}{K^2\omega^2}}$$

et son angle de phase:

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{1}{K\omega R}$$

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Expérience n° 52 Sujet J. D.

Electrodes de 12,5 cmq appliquées sur la face dorsale de chaque poignet.

Résistance apparente mesurée au début de l'expérience avec une intensité de 0,5 milliampère: 18.000 ohms.

Les mesures ont porté sur 7 fréquences.

1° *Mesure des fréquences.*

Par la méthode ci-dessus décrite, nous avons obtenu:

TABLEAU IV

Plots	K	R	f	f^2	T^2
1	520. 10^{-9}	21	2.561	65,6. 10^5	15,3. 10^{-8}
2	526	27	2.245	50,4	19,8
3	532	34	1.990	39,6	25,3
4	540	43	1.756	30,8	32,4
5	558	62	1.439	20,7	48,3
7	600	106	1.061	11,3	88,8
9	700	197,5	715	5,1	195,8

Dans les deux dernières colonnes nous avons indiqué les carrés des fréquences et les carrés des périodes, grandeurs dont nous aurons à nous servir.

2° *Mesure de l'Impédance.*

Le corps est équilibré, pour chaque fréquence, à l'aide des éléments K et R indiqués dans le tableau suivant:

TABLEAU V

Plots	K f.	R ohms	$-\frac{1}{k\omega}$ ohms	— tg φ	— φ γ	Z ohms
1	113. 10^{-9}	808	— 554	0,68	38,0	977
2	115	826	— 617	0,75	40,8	1.031
3	117,5	850	— 681	0,80	43,0	1.089
4	120	873	— 755	0,87	45,4	1.155
5	125	925	— 805	0,96	58,6	1.280
7	130	1037	— 1154	1,11	43,1	1.555
9	141	1245	— 1580	1,27	57,5	2.011
7	131	1039	— 1172	1,10	53,1	1.546
5	122	935	— 907	0,97	49,0	1.301
4	117	900	— 775	0,86	45,2	1.187
3	114,5	878	— 699	0,80	42,8	1.122
2	112	857	— 633	0,74	40,5	1.065
1	109,5	834	— 566	0,68	38,0	1.008

Dans les trois dernières colonnes nous avons marqué les valeurs de la tangente de l'angle de phase, de l'argument φ compté en grades et de l'impédance Z.

L'impédance ainsi mesurée se rapporte au conducteur total; c'est-à-dire au conducteur composé du corps humain et des deux électrodes. Il est impossible de dire la part qui revient au corps et la part qui revient aux électrodes. En effet la résistance des électrodes s'ajoute directement à la partie réelle de la résistance imaginaire du corps humain.

Mais pour savoir quelle modification elle apporte à la partie imaginaire, il faudrait connaître le schéma équivalent au corps humain.

D'ailleurs parler d'impédance et d'angle de phase du corps humain seul, est une pure abstraction, car il n'existe pas d'électrodes non résistantes.

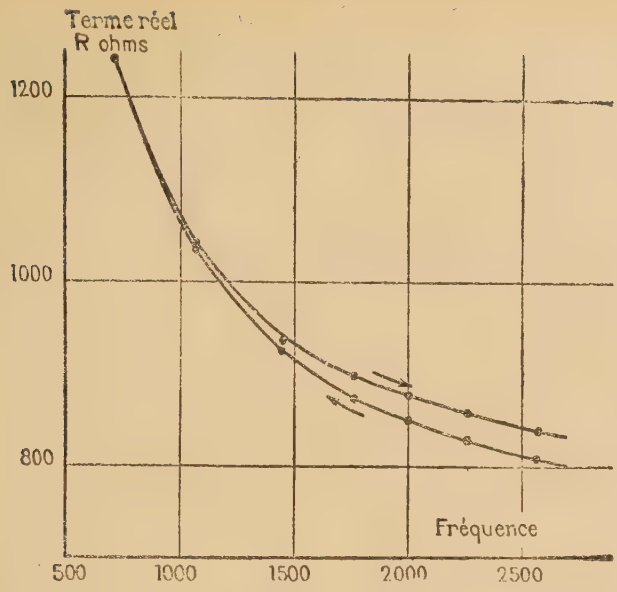

fig. 10

Expérience n° 52. — Variation du terme réel de l'impédance du corps humain en fonction de la fréquence.

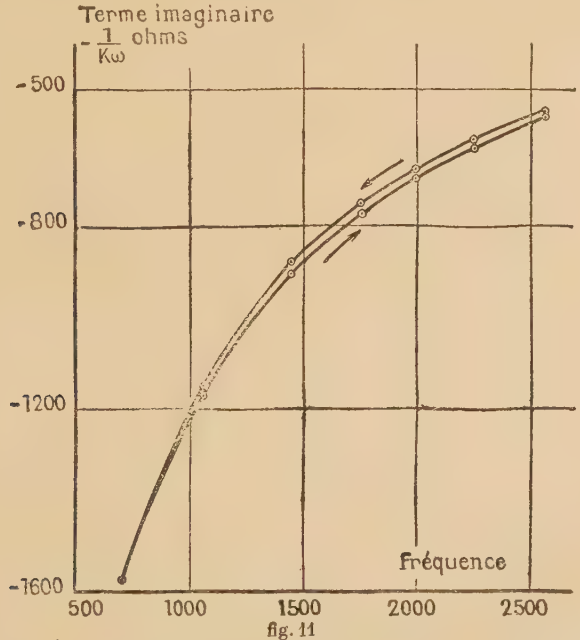

fig. 11

Expérience n° 52. — Variation du terme imaginaire de l'impédance du corps humain en fonction de la fréquence.

Il est vrai que les électrodes au chlorure d'argent que nous avons employées sont relativement plus résistantes que les électrodes en étain employées en électrodiagnostic par exemple.

Les courbes des figures 10 et 11 donnent les valeurs du terme réel R et du terme imaginaire $-\frac{1}{K\omega}$ en fonction de la fréquence.

Ces courbes montrent que ces deux facteurs diminuent en valeur absolue avec la fréquence.

Elles montrent de plus que le passage du faible courant de mesure les font varier; le terme réel augmente avec le passage du courant. Le terme imaginaire augmente également en valeur absolue.

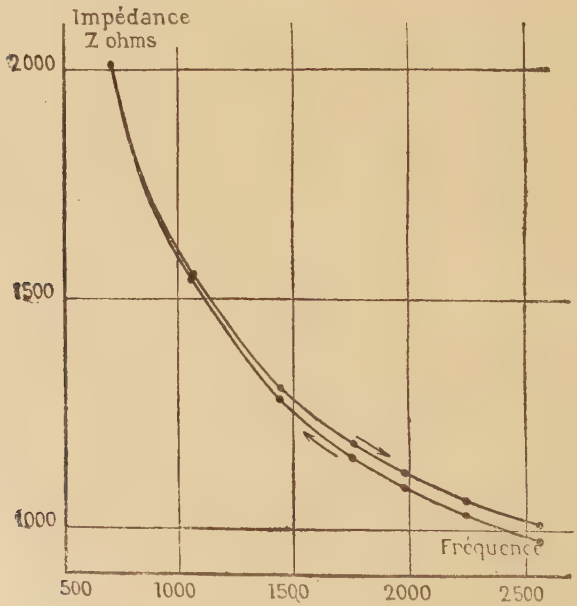

fig. 12

Expérience n° 52. — Variation de l'impédance du corps humain en fonction de la fréquence.

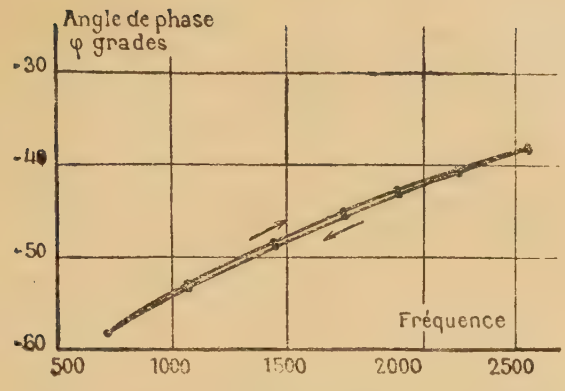

fig. 13

Expérience n° 52. — Variation de l'angle de phase du corps humain en fonction de la fréquence.

Les courbes des figures 12 et 13 donnent la valeur de l'impédance Z et de l'angle de phase φ en fonction de la fréquence. Dans l'intervalle considéré, c'est-à-dire pour des fréquences comprises entre 700 et 2.600, l'impédance et l'angle de phase diminuent en valeur absolue en fonction de la fréquence.

Le passage du courant de mesure augmente la valeur de l'impédance, et diminue la valeur absolue de l'angle de phase.

Ces quelques mesures montrent la valeur élevée de l'argument qui est ici de l'ordre de 50 grades.

CHAPITRE IV

Schéma équivalent au corps humain

Divers auteurs ont cherché s'il n'existait pas un schéma électriquement équivalent au corps humain. Ils ont conclu de leurs travaux qu'en première approximation l'on pouvait considérer que le corps humain se conduisait vis-à-vis du courant électrique comme un conducteur composé d'un condensateur C shunté par une résistance r, le tout mis en série avec une résistance ρ.

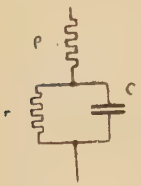

fig. 14

Schéma à trois constantes équivalent au corps humain.

La polarisation s'explique facilement à l'aide de ce schéma. En courant continu la résistance apparente est égale à $r + \rho$. Lorsque le courant continu cesse d'agir le contensateur C se trouve chargé à un potentiel égal à la chute ohmique le long de r. En réunissant les électrodes à un galvanomètre, le condensateur se décharge dans le galvanomètre, c'est ce que l'on appelle le courant de dépolarisation. Si on laisse les électrodes isolées le condensateur se décharge dans la résistance r, et cela d'autant plus vite que la constante de temps de ce circuit est plus faible. On retrouve là la baisse rapide de la polarisation après le passage du courant.

De même à la fermeture d'un courant continu, il

faut un certain temps pour charger le condensateur C.

La faible résistance du corps aux courants alternatifs s'explique de même en considérant la réactance du condensateur. Celle-ci est égale à $\frac{1}{C\omega}$. Cette réactance diminue donc quand la fréquence croît. On retrouve ainsi la baisse de résistance du corps à mesure qu'on élève la fréquence.

La résistance initiale est égale à ρ. En effet au début du passage du courant continu le condensateur C se charge et oppose une résistance nulle au courant. A mesure que son potentiel de charge augmente il oppose une résistance de plus en plus forte jusqu'au moment où il a atteint son régime de charge. A ce moment aucun courant ne le traverse, tout le courant doit passer par la résistance r.

Pour les courants alternatifs, à mesure que l'on élève la fréquence, la réactance du condensateur tend vers zéro, c'est-à-dire qu'il oppose au courant une résistance nulle. Toute la chute de potentiel s'effectue dans la résistance

Mais il est un certain nombre de faits dont ce schéma ne rend pas compte.

Ce sont tout d'abord les variations de la résistance apparente en fonction du courant qui parcourt le corps et en fonction du temps de passage du courant.

Mais ces variations sont d'autant moins accentuées que le courant utilisé est plus faible. Il n'est pas impossible d'admettre que pour des courants très faibles ce schéma ait bien les mêmes propriétés électriques que le corps humain.

De même les différents auteurs qui se sont occupés de la polarisation du corps humain, notamment M. Strohl, ont bien mis en évidence ce fait que la polarisation n'est pas proportionnelle au voltage appliqué

au corps. Quand on augmente ce voltage la polarisation augmente moins vite que lui.

Dans le schéma indiqué ci-dessus la polarisation doit au contraire être proportionnelle au voltage appliqué au corps humain.

En effet la force électro-motrice de polarisation E n'est autre que le potentiel de charge du condensateur C. Celui-ci est déterminé par la chute ohmique de potentiel le long de la résistance r. On a donc:

$$E = r\,I \qquad (1)$$

I étant l'intensité du courant continu qui parcourt le corps humain.

Si V est le voltage appliqué entre les deux électrodes, nous avons: $V = (r + \rho)\,I$

d'où $$I = \frac{V}{r + \rho}$$

Remplaçons I par sa valeur dans l'équation (1)

$$E = \frac{r}{r + \rho} V$$

Autrement dit la force électro-motrice de polarisation E est proportionnelle au voltage V appliqué au corps.

Puisqu'il n'en est pas ainsi dans le corps humain, il faut admettre que la résistance r varie avec l'intensité du courant.

Nous retrouvons ainsi la baisse de la résistance apparente due au passage d'un courant continu.

Divers auteurs ont admis que la capacité C n'était pas de nature électro statique mais était une capacité de polarisation analogue à la capacité de polarisation que présentent des lames métalliques plongeant dans un électrolyte. Ce schéma n'implique pas une polarisation proportionnelle au voltage appliqué, et par là rend compte dans une certaine mesure de la variation de polarisation. Mais on voit mal où se localiseraient au niveau de la peau les réactions chimiques qui constitue-

raient la polarisation. De plus sa vitesse d'apparition et de disparition cadre mieux avec l'hypothèse d'une capacité de nature électro statique.

D'ailleurs dans ces milieux vivants où le courant électrique est véhiculé par des ions de toutes dimensions, il n'y a pas très loin du phénomène d'adsorption des ions au niveau du dielectrique imparfait de la capacité électro statique, à la réaction chimique véritable.

Au sujet de la capacité que présente le conducteur humain il semble que dans certains esprits se soit glissé une confusion regrettable. Cette capacité n'a rien de commun avec la capacité de surface du corps humain. Tout corps isolé dans l'espace présente une capacité; c'est-à-dire que pour élever son potentiel de ΔV il faut lui fournir une charge électrique Q égale à $C\Delta V$.

Cette capacité ne dépend que de la forme géométrique du conducteur envisagé. Le corps humain isolé présente évidemment une telle capacité.

Mais dans la question qui nous occupe, il vaudrait mieux parler de la capacité du conducteur humain. Cette capacité est due, en première approximation, à ce que la peau mauvaise conductrice sépare deux milieux relativement bons conducteurs: l'électrode et le milieu intérieur du corps. La capacité ainsi définie dépend de la taille des électrodes.

Nous avons recherché s'il existait un schéma analogue à celui que nous venons d'indiquer, qui présente, pour les différentes fréquences que nous avons utilisées, la même impédance et le même angle de phase que le corps humain.

Une mesure d'impédance donne deux facteurs: un terme réel et un terme imaginaire; ou, ce qui revient au même, une impédance et un angle de phase.

Or le schéma présente trois inconnues r, c et ρ. Une infinité de schémas différents peuvent être imagi-

nés qui pour une fréquence donnée auront même impédance et même angle de phase que le corps humain.

Pour déterminer un schéma équivalent il nous faut donc prendre deux déterminations.

Mais pour mieux faire ressortir les écarts existants entre le corps humain et un schéma tel que celui que nous envisageons, nous avons préféré rechercher pour chaque point de la courbe le schéma équivalent. Tous ces schémas auront un point commun; c'est la valeur de la résistance ρ. Nous verrons en effet comment cette méthode permet de mesurer avec une certaine approximation la résistance initiale ρ.

La résistance imaginaire du schéma de la figure 14 est:

$$\mathscr{R} = \rho + \frac{r}{1 + r^2 c^2 \omega^2} - j \frac{r^2 c \omega}{1 + r^2 c^2 \omega^2}$$

Cette résistance est égale pour une fréquence donnée à la résistance imaginaire du circuit d'équilibre qui est:

$$\mathscr{R}_1 = R - \frac{j}{K\omega}$$

En égalant les parties réelles et les parties imaginaires, nous obtenons un système de deux équations à deux inconnues r et c:

$$\begin{cases} R = \rho + \dfrac{r}{1 + r^2 c^2 \omega^2} & (1) \\ \dfrac{r^2 c \omega}{1 + r^2 c^2 \omega^2} = \dfrac{1}{K\omega} & (2) \end{cases}$$

La résolution de ce système donne:

$$\begin{cases} c = \dfrac{K}{\omega^2 K^2 (R - \rho)^2 + 1} \\ r = \dfrac{1}{\omega \sqrt{(K - c)\, c}} \end{cases}$$

Appliquons ces formules sucessivement à chaque mesure de l'expérience n° 52 de la page 34.

Nous verrons plus tard comment de cette expérience nous pouvons déduire pour ρ la valeur 725 ohms.

Pour la première mesure nous avons par exemple:

$$c = \frac{113.\ 10^{-9}}{4\,\pi^2.\ 2.561^2\ \overline{113^2.\ 10^{-18}\,(808 - 725)^2 + 1}} = 110{,}5.\ 10^{-9}\ \text{f.}$$

et

$$r = \frac{1}{2\pi.2561\sqrt{(113.10^{-9} - 110{,}5.10^{-9}) \times 110{,}5.10^{-9}}} = 3.731\ \text{ohms}$$

Si nous admettons pour ρ la valeur 725 ohms (seule valeur compatible avec la série de ces mesures) il faut admettre le schéma suivant:

$$\begin{cases} \rho = 725 \text{ ohms} \\ r = 3.731 \text{ ohms} \\ c = 110{,}5\ 10^{-9} \text{ farad.} \end{cases}$$

En recommançant les mêmes calculs pour les diverses fréquences nous trouvons pour r et c des valeurs assez différentes, qui sont indiquées dans le tableau suivant:

TABLEAU VI

Fréquence	r ohms	c 10^{-9} f.	r + ρ ohms
2.561	3.730	110,5	4.555
2.245	3.865	112,0	4.590
1.990	3.850	113,7	4.575
1.756	4.020	115,6	4.745
1.439	4.105	118,9	4.830
1.061	4.570	121,1	5.295
715	5.315	127,2	6.040
1.061	4.480	121,8	5.205
1.439	4.130	115,8	4.855
1.756	3.600	111,3	4.325
1.990	3.325	109,2	4.050
2.245	3.155	107,3	3.880
2.561	3.055	105,6	3.780

Les courbes des figures 15 et 16 donnent la variation de r et de c en fonction de la fréquence.

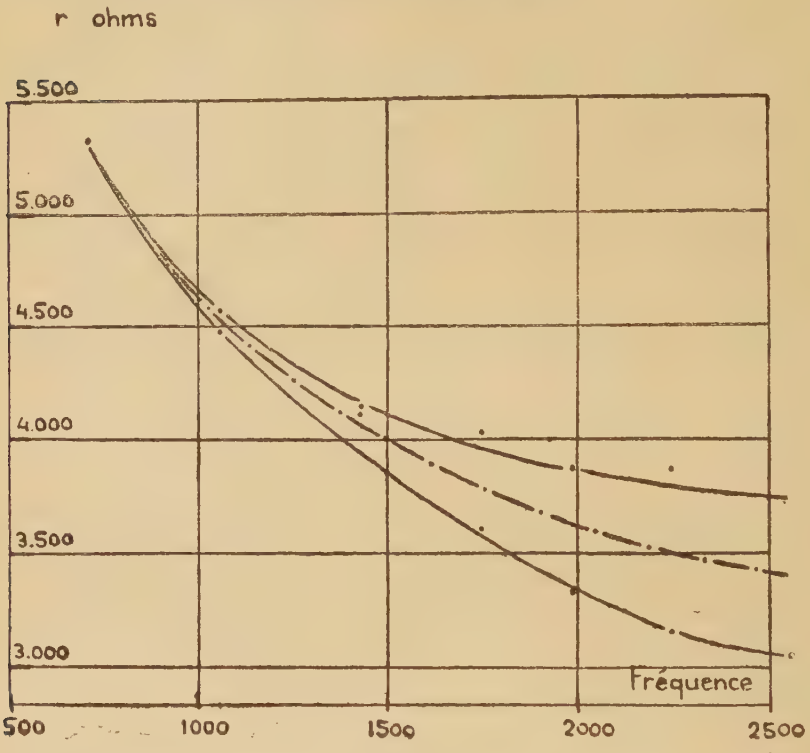

fig. 15

Variation de la résistance shunt du schéma équivalent en fonction de la fréquence Expérience n° 52.

Puisque le corps humain a varié depuis le début jusqu'à la fin de l'expérience, on peut admettre pour valeurs de r et de c au milieu de l'expérience les valeurs données par la courbe moyenne dessinée en pointillé.

On voit ainsi qu'aucun schéma à trois constantes ne peut rendre compte des constantes électriques du corps humain, et que même pour le faible intervalle de fréquences étudié ce schéma n'est valable qu'à 15 pour cent près pour la capacité c et à 40 pour cent près pour la résistance r.

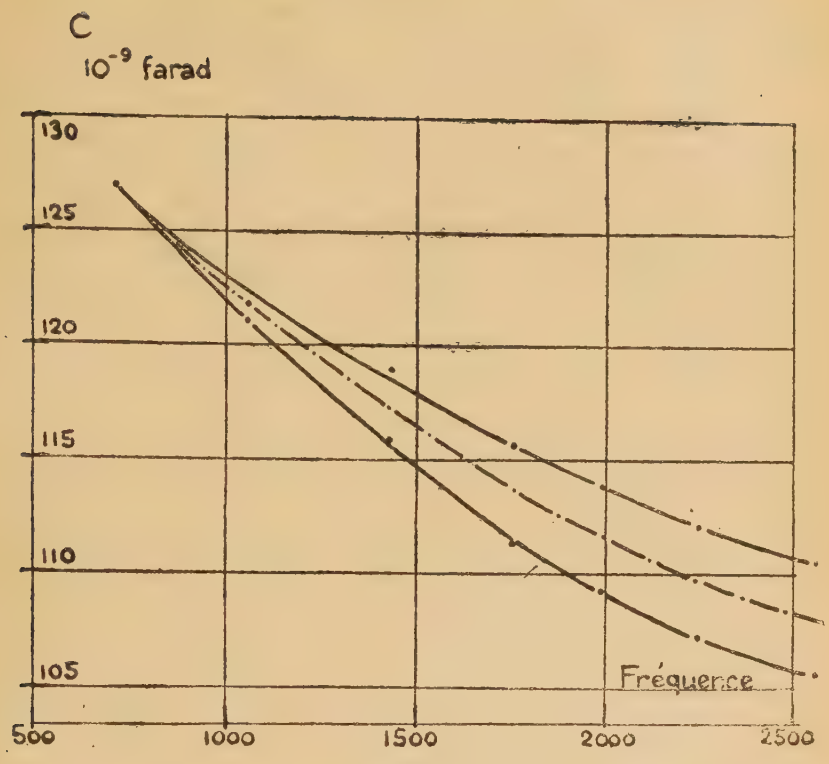

fig. 16

Variation de la capacité du schéma équivalent au corps humain en fonction de la fréquence. Expérience n° 52.

D'ailleurs une autre considération nous indique la non-équivalence de ce schéma au corps humain.

Nous avons vu que la résistance apparente devait être égale à r + ρ. Or si nous calculons ce terme nous voyons qu'il oscille entre 3.500 et 6.000 ohms environ.

Ce n'est pas du tout l'ordre de grandeur de la résistance apparente mesurée expérimentalement. — Nous avons en effet trouvé pour cette valeur 18.000 ohms.

Il est encore un autre procédé pour vérifier l'équivalence du corps humain au schéma précité.

L'équation (1) de la page 44 donne en effet:

$$R - \rho = \frac{r}{1 + r^2 c^2 \omega^2}$$

ou

$$\frac{1}{R - \rho} = r\, c^2\, \omega^2 + \frac{1}{r}$$

Le terme $\frac{1}{R - \rho}$ varie donc linéairement en fonction du carré de la pulsation; donc en fonction du carré f^2 de la fréquence.

Tableau VII

$f^2 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{R - \rho} \times 10^4$
65,57	120,5
50,42	99,0
39,58	80,0
30,84	67,6
20,70	50,0
11,26	32,1
5,11	19,2
11,26	31,9
20,70	47,6
30,84	57,1
39,58	65,4
50,42	75,8
65,57	91,7

La courbe de la figure 17 résume ce tableau.

Or nous voyons que ni les courbes extrêmes, ni même la courbe moyenne ne sont linéaires.

M. le Pr. A. Strohl avait obtenu un résultat analogue par une expérience différente. Il équilibrait dans un pont alimenté en courant interrompu par un buzzer, le corps humain par un conducteur à trois variables tel que celui de la figure 14.

Le courant discontinu peut être, comme nous l'avons vu, décomposé en une série de Fourier. Pour obtenir

une extinction au téléphone, il faut que le pont soit équilibré non seulement pour la fréquence fondamentale mais aussi pour les harmoniques.

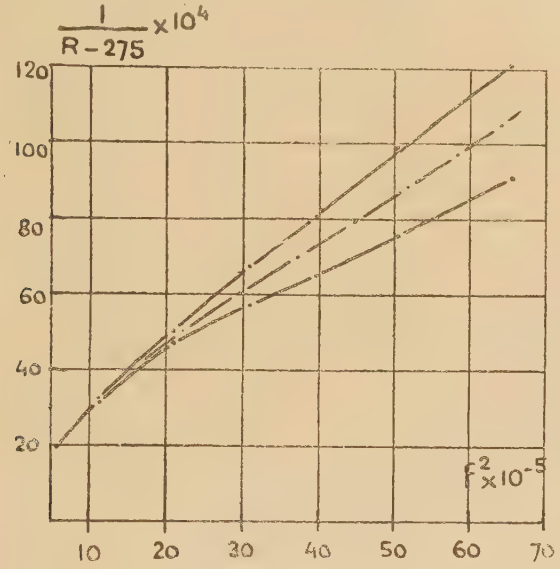

fig. 17

Variation du terme $\frac{1}{R - 275} \times 10^4$ en fonction du carré de la fréquence. Expérience n° 52.

Or le Pr. Strohl a mis en évidence le fait qu'on ne pouvait, par ce procédé, obtenir le silence du téléphone. Il existe néanmoins un minimum. Celui-ci correspond à un conducteur ayant même impédance que le corps humain, pour la fréquence fondamentale et le premier harmonique présent.

Certains auteurs ont pensé donner un schéma réellement équivalent au corps humain en adoptant un schéma plus complexe. Celui-ci comprend alors deux condensateurs shuntés en série (fig. 18). Il fait intervenir cinq constantes ρ, r, r', c, c'.

Alors que le schéma simple à trois constantes pouvait être facilement interprété, il n'en est plus de même

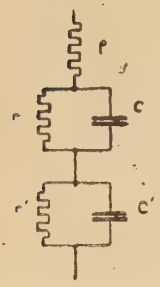

fig. 18

Schéma à cinq constantes équivalent au corps humain.

de ce dernier. D'ailleurs alors que le premier est facile à calculer, la recherche des éléments du second est très pénible car elle aboutit à un système de cinq équations du troisième degré.

De plus il n'est pas douteux que bien des formules à cinq constantes sont capables de vérifier les propriétés du corps humain pour une certaine gamme de fréquence, Il n'est pas plus logique de chercher une formule compliquée telle que celle que donne le schéma de la figure 18, que d'adopter une formule plus simple telle qu'un polynôme du 4e degré par exemple.

Pour que la coïncidence entre des mesures expérimentales, et une formule mathématique soit fructueuse, il faut que celle-ci soit simple.

Dans le cas du conducteur humain, l'étude de son impédance ne nous permet que de poser les conclusions suivantes: —

Le corps humain est électriquement équivalent à un conducteur composé d'une résistance ohmique pure ρ, en série avec un certain nombre de condensateurs c, c', c''... shuntés par des résistances r, r', r''... La résistance initiale est égale à ρ . La résistance apparente en courant continu est égale à $\rho+r+r'+r''+.....$

CHAPITRE V

Mesure de la résistance initiale

Si les valeurs de la capacité et la résistance apparente du corps humain sont assez mal définies, il n'en est pas de même de la résistance initiale. De nombreux travaux ont montré qu'elle semblait être d'une fixité très grande.

Pour avoir la valeur de cette résistance, nous avions eu l'idée de déterminer le schéma équivalent au corps humain en prenant deux mesures effectuées avec des fréquences différentes. Mais les valeurs ainsi obtenues étaient absolument fantaisistes et variaient d'une manière considérable suivant qu'on prenait des points différents d'une même courbe. Dans certains cas nous avons même obtenu des valeurs négatives! Ce résultat s'explique lorsqu'on songe à ce que le schéma simple à trois éléments est différent du corps humain.

Aussi nous sommes-nous adressés, pour obtenir cette résistance, à une autre méthode: la méthode graphique.

On peut considérer le corps humain comme constitué d'une résistance ohmique pure ρ, en série avec une infinité de condensateurs shuntés rc, r'c', r''c'' etc..... La résistance imaginaire de cet ensemble sera donc:

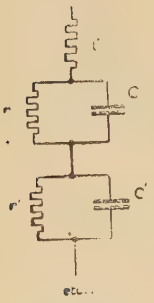

fig. 19
Schéma réellement équivalent au corps humain.

$$\mathcal{R} = \rho + \frac{1}{\frac{1}{r} - \frac{c\omega}{j}} + \frac{1}{\frac{1}{r'} - \frac{c'\omega}{j}} + \text{ etc.}$$

$$\text{ou } \mathcal{R} = \rho + \frac{r}{1 + c^2\omega^2 r^2} + \frac{r'}{1 + c'^2\omega^2 r'^2} + \ldots + \frac{c\,\omega\, r^2 j}{1 + c^2\omega^2 r^2} + \frac{c'^2\omega^2}{1 + c^2}$$

Le terme réel est donc:

$$R = \rho + \frac{r}{1 + c^2\omega^2 r^2} + \frac{r'}{1 + c'^2\omega^2 r'^2}$$

Quand la fréquence augmente ρ reste fixe, mais tous les autres termes diminuent. Ils tendent même vers zéro quand la fréquence devient infinie.

Il en résulte que quand la fréquence devient infinie le terme réel tend vers la résistance initiale.

Pour pouvoir obtenir cette valeur par extrapolation il nous est apparu que la meilleure méthode était de tracer la courbe du terme réel en fonction du carré T^2 de la période.

En effet la courbe de R en fonction de la période T est une somme de fonctions du deuxième degré dont la dérivée est nulle pour T = o mais dont la forme nous est inconnue.

Tandis que la courbe de R en fonction de T^2 est de la forme:

$$R = \rho + \frac{r\,T^2}{T^2 + 4\pi^2 c^2 r^2} + \frac{r'\,T^2}{T^2 + 4\pi^2 r'^2 c'^2} + \ldots\ldots$$

C'est donc une somme de fonctions homographiques autrement dit une somme d'hyperboles équilatères.

Cette fonction présente une asymptote horizontale dont l'ordonnée est égale à la résistance apparente. Elle présente une série d'asymptotes verticales, dont les abcisses sont toutes négatives.

Puisque le corps humain ne s'éloigne pas considéra-

blement du schéma à trois facteurs, on peut admettre que ces hyperboles sont peu différentes et que les asymptotes verticales sont voisines les unes des autres. Donc dans la partie qui nous intéresse c'est-à-dire pour les abcisses positives la courbe diffèrera peu, comme allure générale, d'une hyperbole équilatère.

Nous avons donc le droit de faire une extrapolation jusqu'au point d'abscisse zéro. Reprenons l'expérience n° 52 décrite plus haut. Et calculons le carré de la période pour chaque mesure.

On a $T^2 = \frac{1}{f^2}$

On obtient le tableau suivant:

TABLEAU VIII

$T^2 \times 10^2$ (secondes)^2	R ohms
15,3	808
19,8	826
25,3	850
32,4	873
48,3	925
88,8	1037
195,8	1245
88,8	1039
48,3	935
32,4	900
25,3	878
19,8	857
15,3	834

La courbe de la figure 20 résume ce tableau. L'extrapolation des deux courbes de mesures — mesures en fréquences décroissantes et mesures en fréquences croissantes — donnent la même valeur 725 comme ordonnée à l'origine.

La résistance initiale du conducteur total est donc de

725 ohms. La résistance des électrodes étant de 30 ohms la résistance initiale du corps humain est de 695 ohms.

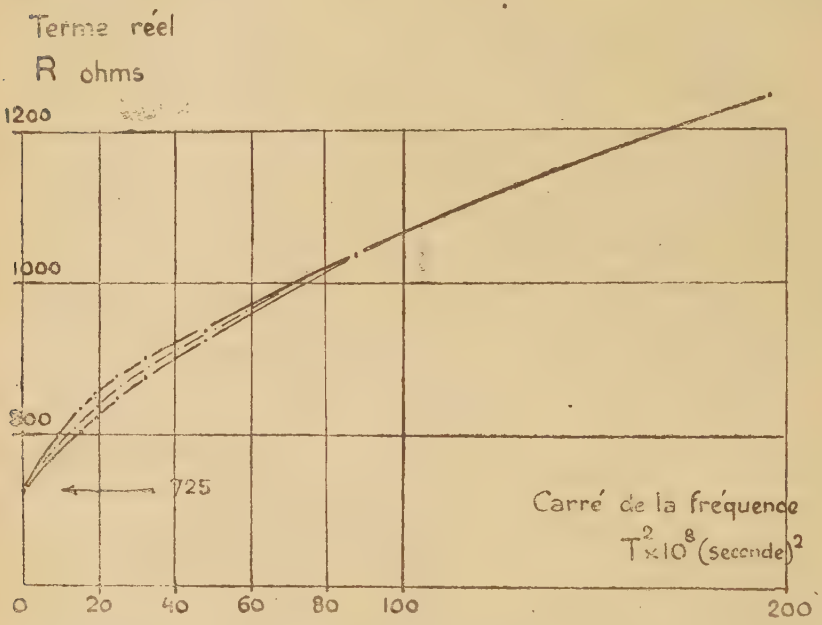

fig. 20

Variation du terme réel de l'impédance du corps humain en fonction du carré de la période. Expérience n° 52.

Précision de la méthode

Pour que l'extrapolation soit précise, il faut posséder des points de la courbe très rapprochés de l'origine. Autrement dit il faut effectuer les mesures avec une fréquence élevée. Nous nous sommes arrêtés dans l'expérience n° 52 à une fréquence maxima de 2.560. Mais on aurait intérêt à monter jusqu'à 3.500 environ.

La fréquence émise par l'oscillateur dépend de la triode oscillatrice employée; elle dépend de l'intensité du courant de chauffage. C'est pourquoi il est des expériences dans lesquelles nous avons utilisé des fré-

quences supérieures à 3.000; dans d'autres il s'est trouvé que la fréquence maxima était plus faible.

Il est par contre inutile d'employer des fréquences beaucoup plus élevées car les difficultés inhérentes aux mesures en haute fréquence interviennent alors. De plus le gain de précision n'est pas proportionné à la difficulté de ces mesures.

Il est une autre condition à la précision de l'extrapolation; elle réside dans la forme de la courbe. Il faut qu'elle ne soit pas trop inclinée. Or les courbes sont d'autant plus inclinées que les électrodes sont plus rapprochées et surtout que leur surface est plus petite.

Prenons comme exemple l'expérience 28.

Expérience n° 28

Sujet G. O.

Electrodes de 1,5 cmq de surface placées l'une à la face antérieure du poignet droit, l'autre à mi-distance de celle-ci et du pli du coude.

Le tableau suivant donne la valeur R du terme réel.

TABLEAU IX

Fréquence	$T^2 \times 10^6$	R ohms
726	189,7	3800
1041	91,7	3020
1469	46,3	2380
1826	30,0	2110
2088	22,9	1945
2290	19,1	1830
2624	14,5	1650

La courbe de la figure 21 résume les données de ce tableau. On voit que l'extrapolation donne une valeur de la résistance initiale dont l'ordre de grandeur est 800.

Mais l'approximation est très mauvaise car nous pouvons aussi bien admettre 600 que 1000.

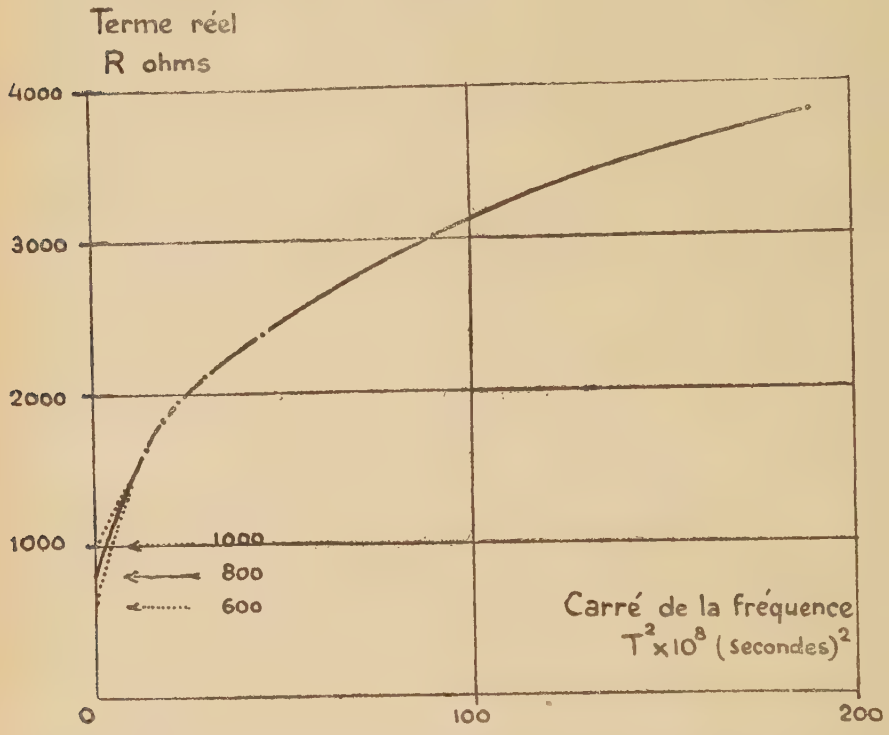

fig. 21

Variation du terme réel de l'impédance du corps humain en fonction du carré de la période. Expérience n° 28.

En pratique les mesures effectuées avec des électrodes très petites (de 1,5 cmq) n'ont donné que des chiffres inutilisables, sauf dans le cas où les électrodes étaient placées chacune sur un poignet.

Cette méthode ne nous a paru susceptible de donner une mesure précise de la résistance initiale que lorsque l'on employait des électrodes d'au moins 2,4 cmq de surface. Quand on arrive à 8 cmq de surface, les évaluations deviennent très précises.

CHAPITRE VI

Etude de la résistance initiale

Etude de la résistance initiale

La résistance initiale semble être le facteur qui, dans le conducteur, possède la plus grande fixité.

La résistance initiale n'est pas influencée par le passage d'un courant.

Ainsi dans l'expérience 52, le passage du courant de mesure avait considérablement modifié la résistance apparente. Au début, avant les mesures, celle-ci était de 18.000 ohms. Après la septième mesure, elle était tombée à 15.000 ohms; et, à la fin de l'expérience, sa valeur n'était plus que de 13.000 ohms.

Or la figure n° 20 nous montre que l'extrapolation des trois courbes ci-dessus décrites, donne une seule et même valeur pour la résistance initiale.

Le fait que ces courbes concourrent en un même point d'abscisse zéro, montre donc que la résistance initiale n'a pas été modifiée par le courant de mesure qui pourtant modifiait considérablement la résistance apparente.

D'ailleurs cette fixité de la résistance initiale nous est prouvée par une autre expérience. Nous avons me-

suré la résistance initiale d'un sujet pour le même emplacement des électrodes, et la même surface de celles-ci, à plusieurs jours et même plusieurs semaines d'intervalle. Les résultats concordent à moins de trois pour cent près dans la série d'expériences suivante.

Sujet S. D. Electrodes de 12,5 cmq de surface, appliquées l'une sur la face antérieure du poignet droit, l'autre au niveau du point moteur du long supinateur droit.

Trois mesures ont été effectuées. Voici leur résultat:

TABLEAU X

Expérience n° 5	du 16-12-27	$\rho = 290$
Expérience n° 6	du 22-12-27	$\rho = 290$
Expérience n° 18	du 10-1-28	$\rho = 280$

Dans chaque mesure l'erreur absolue était inférieure à $\pm$ 5 ohms.

Pour obtenir des mesures aussi concordantes il est nécessaire de repérer soigneusement la place des électrodes, de façon à les replacer exactement dans la même position. Il est bon également de placer le membre dans la même position.

Variation de la résistance initiale en fonction de la surface des électrodes

La résistance initiale diminue quand on augmente la surface des électrodes.

Nous avons vérifié ce fait par de nombreuses expériences. Celles-ci malheureusement ne peuvent être très précises à cause de la difficulté que j'ai citée plus haut de replacer exactement les électrodes au même endroit.

La surface des électrodes variant de 2,5 cmq à 12,5 cmq celles-ci n'intéressent pas exactement les mêmes tissus, même si leur centre coïncide rigoureusement.

Cette hétérogénéité des tissus intéressés est une cause perturbatrice qui fait que les courbes que nous avons obtenues présentent parfois des écarts assez grands.

Ces expériences permettent néanmoins de se rendre compte de la façon dont varie la résistance initiale en fonction de la surface des électrodes.

Nos expériences ont porté sur quatre positions des électrodes que nous appellerons positions I, II, III et IV.

Dans la position I une électrode est placée à la face antérieure du poignet droit; l'autre se trouve à mi-distance de la première et du pli du coude droit.

Dans la position II une électrode est placée à la face antérieure du poignet droit; l'autre se trouve au niveau du point moteur du long supinateur droit.

Dans la position III une électrode est placée à la face antérieure du poignet droit; l'autre se trouve au niveau du tiers moyen du corps du biceps droit.

Dans la position IV une électrode est placée à la face antérieure du poignet droit; l'autre se trouve à la face antérieure du poignet gauche.

Pour chaque position nous avons successivement mesuré la résistance initiale, pour des électrodes de 2,5, 5, 8 et 12,5 cmq de surface.

Les résultats de ces mesures sont réunis dans les quatre tableaux suivants, où ρ représente la résistance initiale du corps humain, obtenue en retranchant du chiffre obtenu par extrapolation de la courbe du terme réel, la résistance des électrodes.

Dans la quatrième colonne de ces tableaux nous avons indiqué la conductance initiale, c'est-à-dire l'inverse de la résistance initiale.

Ces tableaux montrent nettement la diminution de la résistance initiale en fonction de la surface des électrodes.

Tableau XI

Sujet G. O. Résistance initiale ρ en ohms et conductance initiale X en millième de mho. — Position I.

Surface des électrodes	N° de l'expérience	ρ	X	Résistance apparente
2,5	44	570	1,75	70000
5	27	305	3,28	56000
8	9	200	5,00	27000
12,5	40	165	6,06	36000

Tableau XII

Sujet G. O. Résistance initiale ρ en ohms et conductance initiale X en millième de mho. — Position II.

Surface des électrodes	N° de l'expérience	ρ	X	Résistance apparente
2,5	45	720	1,39	66000
5	26 48	365 385	2,74 2,60	60000 54000
8	10 50	310 300	3,23 3,33	23000 56000
12,5	41	215	4,65	40000

Tableau XIII

Sujet G. O. Résistance initiale ρ en ohms et conductance initiale X en millième de mho. — Position III.

Surface des électrodes	N° de l'expérience	ρ	X	Résistance apparente
2,5	46	820	1,22	58000
5	25 49	455 455	2,20 2,20	36000 46000
8	11 51	420 330	2,38 3,03	18000 44000
12,5	42	335	2,99	36000

TALLEAU XIV

Sujet G. O. Résistance initiale ρ en ohms et conductance initiale X en millième de mho. — Position IV.

Surface des électrodes	N° de l'expérience	ρ	X	Résistance apparente
2,5	47	1120	0,89	62000
5	24	705	1,42	42000
8	12	640	1,56	19000
12,5	43	595	1,68	42000

Nous avions fait également des mesures avec des électrodes de 1,5 cmq de surface. Mais les évaluations la résistance initiale sont avec des électrodes d'aussi faible surface, fort peu précises. Aussi avons-nous cru préférable de ne pas en tenir compte.

Les courbes de la figure 22 résument les quatre tableaux précédents.

Sur ces courbes l'on voit que la conductance initiale du corps humain ne varie pas linéairement en fonction de la surface des électrodes. Elle augmente plus lentement que celle-ci.

La résistance initiale n'est donc pas inversement proportionnelle à la surface de l'électrode.

Nous avons essayé de voir si une loi simple ne rendrait pas compte de ces courbes.

La résistance initiale du corps humain peut être considérée comme constituée de deux résistances en série; d'abord la résistance des plans situés immédiatement sous les électrodes; et enfin la résistance du segment de membre interposé entre les deux électrodes.

Cette seconde résistance est évidemment indépendante de la surface des électrodes. Quant à la première elle en dépend certainement et l'hypothèse qui vient de suite

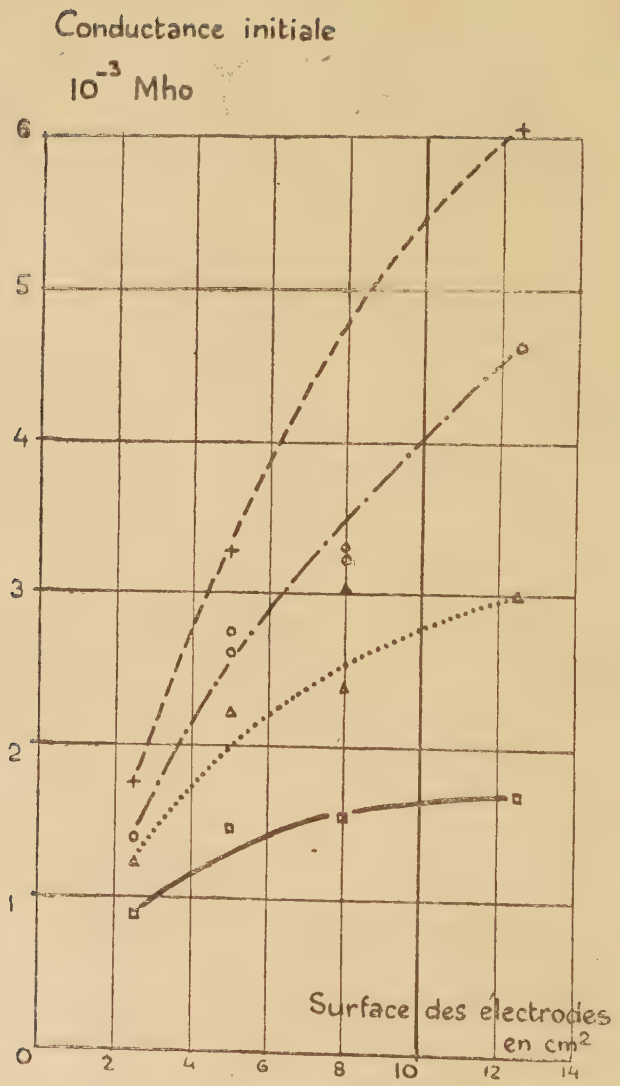

fig. 22

Variations de la conductance initiale en fonction de la surface des électrode Voir tableaux XI, XII, XIII et XIV).

à l'esprit est celle d'après laquelle cette résistance serait inversement proportionnelle à la surface de l'électrode.

Sous une forme mathématique on peut donc prévoir pour ρ une formule de la forme:

$$\rho = \frac{a}{S} + b$$

ou $\frac{a}{S}$ est la résistance des plans situés immédiatement sous les électrodes, et b la résistance du segment de membre interposé entre les deux électrodes.

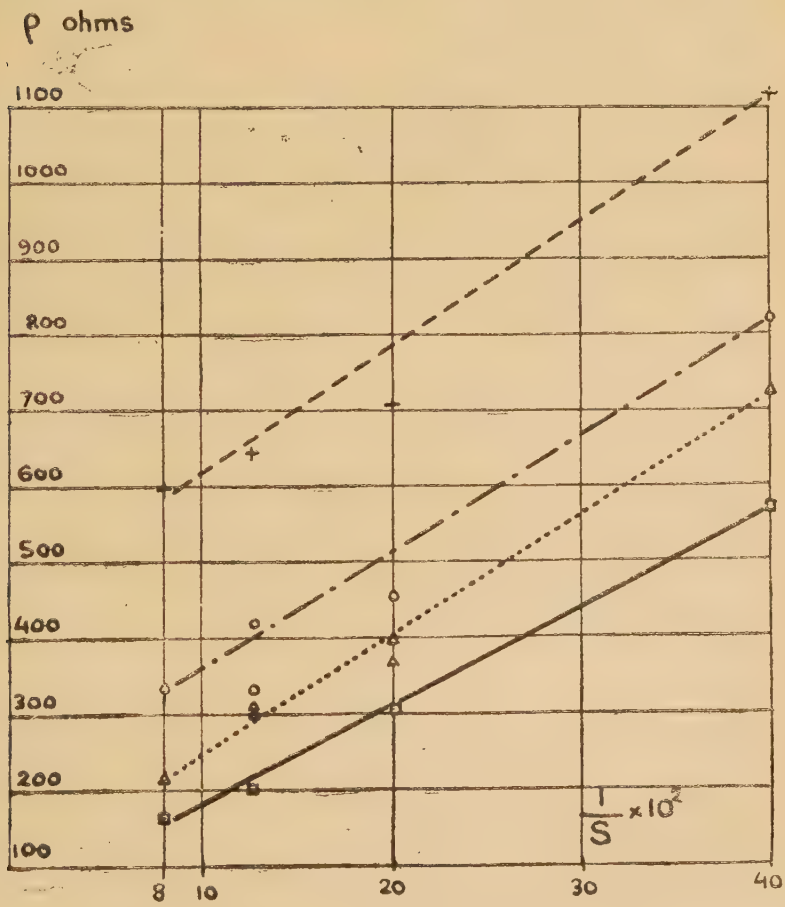

fig. 23

Variations de la résistance initiale en fonction de l'inverse de la surface des elctrodes (Voir tableaux XI, XII, XIII et XIV).

D'après cette hypothèse la résistance initiale varierait linéairement en fonction de l'inverse de la surface des électrodes.

Les courbes de la figure 23 représentent les courbes expérimentales de la résistance initiale en fonction de l'inverse de la surface de l'électrode pour les positions I, II, III et IV.

On voit que malgré la mauvaise précision des points obtenus, la courbe semble bien être une droite qui ne passe pas par l'origine, ainsi que le veut la relation établie plus haut.

Influence de la distance des électrodes sur la résistance initiale

La résistance initiale croît lorsqu'on éloigne les électrodes. Reprenons les données des tableaux XI, XII, XIII et XIV. On les retrouve groupées dans le tableau XV.

TABLEAU XV

Résistance initiale en ohms pour diverses positions des électrodes.

Surface des électrodes	Résistance initiale			
	Pos. I	Pos. II	Pos. III	Pos. IV
2,5	570	720	820	1120
5	305	365 385	455 455	705
8	200	310 310	420 330	640
12,5	165	215	335	595

Ce tableau montre que pour des électrodes de surface donnée, la résistance initiale croît avec l'écartement des électrodes.

CHAPITRE VII

Mesure de la Polarisation

La connaissance de la résistance initiale et de la résistance apparente permet de calculer la polarisation.

Néanmoins il faut ici faire une réserve. M. le Pr A. Strohl a montré que la polarisation n'était pas proportionnelle au voltage appliqué au corps humain.

Si nous écrivons: $E = P \times V$

E étant la valeur de la force contre-électromotrice de polarisation et V le voltage appliqué au corps humain, P représente un facteur de dimensions nulles qui varie avec le terme V.

Cette variation ne peut être due à une variation de la résistance initiale; car nous avons vu que cet élément est d'une fixité remarquable. La cause de cette variation ne peut donc être trouvée que dans la variation de la résistance shunt r, ou des résistances shunt r, r', r'' etc... suivant que l'on admet le schéma simplifié ou un schéma plus complexe.

Les résistances apparentes ont été calculées dans nos expériences, en mesurant la différence de potentiel aux bornes du sujet quand celui-ci est parcouru par un courant continu de 0,5 milliampère.

Le facteur P qui est alors égal à $\frac{r}{\rho + r}$ se rapporte donc à cette intensité.

Le facteur r est égal à la différence entre la résistance apparente et la résistance initiale. Et le facteur $\rho + p$ est égal à la résistance apparente. Les chiffres trouvés pour P oscillent tous entre 0,90 et 0,995.

Autrement dit la polarisation est trouvée égale aux 95 centièmes environ de la différence de potentiel appliquée au corps humain. Nous retrouvons bien ainsi les valeurs indiquées par le Pr. Strohl.

La polarisation P semble peu influencée par la surface des électrodes. Mais il est indispensable de remarquer que les mesures de résistance apparente ont été faites toutes sous une intensité égale à 0,5 milliampère, et que, dans ces conditions, la densité du courant par unité de surface de l'électrode n'était pas constante.

CONCLUSIONS

L'étude de la conductibilité du corps humain en courants périodiques ne peut donner de résultats précis que si l'on emploie des courants de forme et de fréquence bien déterminées.

En raison des difficultés inhérentes aux mesures en haute fréquence, nous avons porté notre choix sur les courants alternatifs de fréquence audible.

Nous avons réalisé un oscillateur à lampes donnant un courant alternatif de fréquences variant de 500 à 3.500; courant assez rigoureusement sinusoïdal, c'est-à-dire pratiquement dépourvu d'harmoniques.

Pour éviter les capacités parasites entre le pont et la terre, il est nécessaire d'alimenter le pont à l'aide d'un transformateur possédant entre les deux enroulements un écran mis à la terre.

La stabilité de la fréquence du courant sinusoïdal ainsi obtenu, ne peut être assurée qu'en interposant entre le transformateur d'alimentation du pont et l'oscillateur à triode, un étage de couplage qui évite toute réaction des circuits du pont sur l'oscillateur.

Il est indispensable d'éloigner le pont de l'oscillateur d'une distance d'au moins six mètres pour éviter que des courants parasites ne s'induisent dans les branches du pont.

Quand on étudie le passage d'un tel courant alternatif dans le corps humain, il est nécessaire de substituer à

la notion de résistance électrique celle d'impédance.

Le corps humain présente une réactance de capacité c'est-à-dire que son argument est négatif. La tension est en avance sur l'intensité.

Quand la fréquence augmente, l'impédance diminue, et l'angle de phase diminue en valeur absolue pour une gamme de fréquences comprises entre 500 et 3.000.

Aucun schéma à trois constantes n'est capable de rendre compte quantitativement des variations d'impédance du corps humain, même dans la gamme explorée. (500-3.000).

Quand la fréquence augmente, le terme réel de l'impédance du corps humain tend vers une limite qui n'est autre que la résistance initiale.

Par extrapolation de la courbe représentant les variations du terme réel en fonction du carré de la période du courant alternatif employé, on obtient une mesure assez précise de la résistance initiale.

L'étude de la résistance initiale montre que c'est là un facteur très fixe; pour une même position des électrodes on retrouve toujours les mêmes chiffres, même à plusieurs semaines d'intervalle.

Le passage du courant électrique ne fait pas varier la valeur de la résistance initiale.

La résistance initiale dépend de la surface des électrodes; elle diminue quand on augmente la surface de celles-ci.

Des mesures effectuées avec des électrodes de surface variant de 2,5 à 12,5 cmq montrent que la résistance initiale varie linéairement en fonction de l'inverse de la surface de l'électrode.

La valeur de la résistance initiale augmente avec l'éloignement des électrodes.

Vu :

Le Doyen,

ROGER.

Vu :

Le Président de Thèse,

STROHL.

Vu et permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

CHARLETY.

BIBLIOGRAPHIE

G. Bourguignon. — Mesures de résistances par les décharges de condensateur. (Soc. de Biol., 17 juin 1916).

L. Cahen et J. Carvallo. — Les mesures des grandeurs électriques sous courant alternatif de fréquence musicale. (Le Journal de Physique et le Radium, avril 1924, série 6, t. V, p. 113.)

J. Carvallo. — Quelques considérations d'ordre pratique concernant l'emploi du pont de Wheastone en courant alternatif (Revue Générale de l'Electricité, Tome XVII, n° 9, Février 1925).

Castex. — Précis d'Electricité médicale. Paris 1907.

M. Chanoz. — Contribution à l'étude de la polarisation de l'homme vivant (Annales d'Electrobiologie et de Radiologie, 1908-1910).

J. Cluzet. — Electro-diagnostic au moyen des décharges de condensateurs. (Journal de Radiologie et d'Electrologie, mars 1914, p. 121).

E. David. — Ueber die sekundâr elektromotrischen Eigenschaften der menschlichen Haut. (Arch. f. d. ges. Physiol. t. 195, 1922)

Du Bois-Reymond. — Ueber sekundär elektromotor. Erscheinungen an Muskeln, Nerven und elektr. organen. (Sitzungsber der Berliner Academie, 1883, 1889 et 1890).

W. Einthoven und J. Bijtel. — Uber Stromleïtung durch den meuschlichen Körper (Pflügers Archiv 198 Band 1923).

Ph. Fabre, H. Desgrez et J. Dubost. — Excitation musculaire par dépolarisation électrique. Secousse de shunt. (C. R. Soc. de Biologie, tome XCVI, n° 5, 11 février 1927).

Frey et Wundscheid. — Der faradische Leitungswiderstand des meuschlichen Körpers (Neurologisches Centralblatt, 1891).

Galler. — Ueber den elektrischen Leitungswiderstand der tierischen Körpers (Pflügers Archiv, t. 149, 1913).

M. Gildemeister. — Ueber die in tierischen Körper bei elektrischen Durchströmung entstehenden Gegenkräfte. (Pflügers Archiv, t. 149, 1913, et Ibid., t. 162).

M. Gildemeister. — Ueber Polarisation, Kapazität und Leitungswiderstand tierischer Gewebe. (Zentralblatt, f. Physiol., t. 28, 1914).

M. Gildemeister. — Zur Theorie der sekundär elektromotrischen Eigenschaften der menschlichen Haut. (Arch. f. d. ges. Physiol., t. 195, 1922).

Hague et T. Mather. — Alternating current Bridge Methods, (Pitmann, Londres, 1923).

C.-E. Hay. — Alternating Current Measurements. (Institution of Post Office electrical Engineers Proceedings, novembre 1912, n° 53).

Hermann. — Ueber den Längs un Querwiderstand der Muskeln. (Arch. f. d. ge. Physiol. XXIX),

HERMANN. — Untersuchungen uber die Polarisation der Muskeln und der Nerven. (Arch. f. d. ges. Physiol. XLII).

HOBER. — Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe, Leipzig, 1911).

JOLLY. — Untersuchungen über den elektrischen Leitungswiderstand des menschlichen Körpers (Fetschrift, Strassburg, 1884).

L. LAPICQUE. — Techniques nouvelles pour l'électrodiagnostic. (C. R., t. 161, 22 novembre 1915).

L. LAPICQUE. — Considérations préalables sur la nature du phénomène par lequel l'électricité excite les nerfs. (Journal de Physiol. et de Pathol. génér. 1907. p. 365).

L. LAPICQUE. — Expériences montrant qu'il n'y a pas une durée-limite pour l'excitation (Journal de Physiol. et de Pathol. génér., 1908, p. 264).

L. LAPICQUE.— Théorie de l'excitation électrique. (Journal de Physiol. et de Pathol. génér., 1908, p. 601).

L. LAPICQUE. — Conditions physiques de l'excitation électrique étudiées sur un modèle hydraulique de la polarisation. (Journal de Physiol. et de Pathol. génér., 1909, p. 1019).

L. LAPICQUE. — Conditions physiques de l'excitation électrique. (Journal de Physiol. et de Pathol. génér., 1910, p. 1009 et 1035).

L. LAPICQUE et J. PETETIN. — Nouvelles recherches sur un modèle de polarisation en vue de la théorie physique de l'excitation. (Journal de Physiol. et de Pathol. génér., 1910, p. 696).

L. Lapicque. — Polarisation de membranes dans les électrolytes du milieu physiologique reproduisant la loi de l'excitation électrique des nerfs. (C. R. de la Soc. de Biol., 6 juillet 1907, p. 37).

L. Lapicque. — Recherches quantitatives sur l'excitation électrique des nerfs traitée comme une polarisation. (Journal de Physiol. et de Pathol. génér., 1907, p. 620).

Larat. — Traité pratique d'Electricité médicale, Paris 1910.

St. Leduc. — Sur la résistance électrique du corps humain. (Annales d'Electrobiologie et de Radiologie, 1908).

K. Lucas. — On the rate of development of the excitatory process in muscle and nerve (Journal of Physiology, t. XXXVII, p. 459, 1908).

W. Nernst. — Zur theories des Elektrischen Reizes. (Pflügers Archiv., t. CXXII, 1908, pp. 275-314).

Overton. — Beiträge zur allgemeinen Muskel und Nervenphysiologie. (Pflügers Archiv., t. 82, 1902).

Philippson. — Les lois de la résistance électrique des tissus vivants. (Bull. de la classe des Sc. de l'Ac. royale de Belgique, 4 juin 1921).

Philippson. — Application des lampes à trois électrodes à la mesure de la résistance électrique des cellules et des tissus vivants. (Arch. intern. de Physiol., vol. XVIII, août-décembre 1921).

PHILIPPSON. — Sur une nouvelle forme de résistance électrique des électrolytes. (Classe des Sc. Ac. roy. de Belgique, 4 février 1922).

SCHWARTZ. — Ueber das galvanische Verhalten der konstant durchströmtren Froschaut bei Reizung ihrer Nerven. (Zentralblatt fur Physiologie, t. XXVII, 1913).

SILVA et PESCAROLO. — Della resistenza electrica del corpo umano in condizioni normali e pathologische. (Rivista sperimentale XV, 1889).

STINTZING et GRAEBER. — Der Elektrophysiologische Leitungswiderstand des menschlichen Körpers und seine Bedeutung fûr die Elektrodiagnostik. (Deutsch. Arch. f. Klin. Med., XL, 20 janvier 1887).

A. STROHL. — Etude sur la conductibilité électrique du corps humain pour des courants de courte durée. (Archives de Physique biologique, 10 mars 1922).

A. STROHL. — Recherches sur la mesure de l'excitabilité électrique neuro-musculaire chez l'homme. (Arch. d'Electr. Med. n° 477, juin 1922).

A. STROHL. — Essai d'évaluation des modifications produites dans l'excitation électrique par le passage des courants continus. (Soc. de Biol., t. XXXVIII, p. 1277, 1923).

A. STROHL et A. DOGNON. — L'utilisation des circuits à grande self pour réaliser l'excitation électrique par courants constants chez l'homme. (Journal de Radiologie et d'Electrologie, avril 1923).

A. Strohl et A. Dognon. — Recherches sur la polarisation électrique (Journal de Physiol. et de Pathol. générale, t. XXII, n° 1, 1924, p. 36-51).

A. Strohl. — Contribution à l'étude physique de la conductibilité électrique des organismes vivants. (Thèse, Fac. des Sciences de Paris, 1924).

A. Strohl et H. Iodka. — Recherches sur la résistance initiale du corps humain. (Journal de Radiologie, t. IX, mars 1925).

A. Strohl et F. Portes. — Recherches expérimentales sur les électrodes dites impolarisables. (Annales de Physiol. et de physico-chimie biologique, n° 1, 1927).

Swinburne. — De l'effet du courant continu et du courant alternatif sur le corps humain. (La lumière électrique, 1890).

Verry et Colle. — L'excitabilité du cœur de grenouille perfusé à la solution glucose-bicarbonate. (C. R. de la Soc. de Biol., t. XCI, 1924, p. 104).

Vigouroux. — Sur la résistance électrique considérée comme signe clinique. (Progrès médical, 1888, p. 86).

N. Waterman. — Weitere elektrochemische Untersuchungen über Carcinom. (Zeitschrift für Krebsforschung. Sonderabdruck aus 20 Band, Heft 6).

N. Waterman. — Physikalisch — chemische Untersuchungen über das Karzinom. (Biochemische Zeitschrift. Sonderabdruck aus 133 Band, Heft 4/6).

N. Waterman. — Contribution à l'étude physico-chimique des tumeurs. (Bulletin de l'Association française pour l'étude du Cancer. tome XII, n° 2, février 1923).

G. Weiss. — Choix de la méthode à employer dans les mesures de résistance du corps humain. (Bulletin de la Société des Electriciens, mars 1889).

G. Weiss. — La résistance électrique du corps humain. (Archives d'Electricité médicale, 1893).

G. Weiss. — Sur la possibilité de rendre comparable entre eux les appareils servant à l'excitation électrique. (Arch. ital. de Biol., t. XXXV, fasc. III, pp. 413-452, 1901)

TABLE DES MATIÈRES

Avant-Propos 1

Chapitre I. — Historique.

Résistance apparente..... 3
Polarisation..... 7
Résistance initiale..... 14
Mesures en courant faradique..... 16
Mesures en courant alternatif..... 17

Chapitre II. — De l'impédance du corps humain.

Notation imaginaire..... 19
Mesure d'une impédance par le pont de Wheastone 20
Critique des techniques précédentes..... 21

Chapitre III. — Mesure de l'impédance du corps humain.

Technique.
Oscillateur..... 23
Electrodes..... 27
Mesure de la fréquence employée..... 29
Calcul d'erreur sur la fréquence..... 31
Exemple de mesure de fréquence..... 31
Mesure de l'intensité du courant utilisé..... 32
Mesure d'une impédance et d'un angle de phase 34
Résultats expérimentaux 35

Chapitre IV. — Schéma équivalent au corps humain 40

Chapitre V. — Mesure de la résistance initiale... 51
Précision de la méthode..... 54

Chapitre VI. — Étude de la résistance initiale.... 57
Variation de la résistance initiale en fonction de la surface des électrodes..... 58
Influence de la distance des électrodes sur la résistance initiale 64

Chapitre VII. — Mesure de la Polarisation..... 65

Conclusions 67

Bibliographie 70

Table des Matières..... 77

Imp. LES PRESSES MODERNES
45, Rue de Maubeuge, PARIS
Ateliers à TROYES (Aube)